

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Andrija Belošević

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.

Student:

Andrija Belošević

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Damiru Markučiću na velikoj pomoći i podršci tijekom izrade ovog rada. Također, zahvaljujem se laborantu Tomislavu Kezeleu na pruženim savjetima i pomoći tijekom izrade eksperimenta.

Ovim putem od srca zahvaljujem svojim najbližima na neizmjernoj podršci pruženoj tokom studija.

Andrija Belošević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Andrija Belošević**

Mat. br.: 0035192506

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje zavarenih spojeva računalnom radiografijom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Weld Inspection using Computed Radiography**

Opis zadatka:

Za razliku od konvencionalnog radiografskog ispitivanja zavarenih spojeva snimanjem na film, kod ispitivanja tehnikom industrijske računalne radiografije (*CR - Computed Radiography*) uspostavljeni su drugačiji tehnički zahtjevi u pogledu kvalitete slike. Kvaliteta konačnog digitalnog slikovnog zapisa rezultat je čitavog niza parametara počevši od postavki radiografskog snimanja te u konačnici parametara skeniranja slikovnih ploča. Značajke kvalitete digitalnog slikovnog zapisa izravno su u vezi s ostvarenom radiografskom osjetljivošću, odnosno s najmanjim veličinama nepravilnosti koje se mogu pronaći.

U radu je potrebno analizirati ostvarene parametre kvalitete slikovnih zapisa te postignute osjetljivosti u odnosu na tehničke zahtjeve referentnih normi i u odnosu na kriterij prihvatljivosti, odnosno zahtijevanu razinu kvalitete zavarenog spoja. U tu svrhu potrebno je u eksperimentalnome dijelu rada provesti radiografsko snimanje uzoraka za dvije vrste odabranoga materijala i za odabrani raspon debljina osnovnog materijala. Dobivene rezultate, kao i cijeli provedeni postupak ispitivanja, komentirati s obzirom na relevantne zahtjeve važećih normi.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. studenog 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Datum predaje rada:

18. siječnja 2018.

Predvideni datum obrane:

24., 25. i 26. siječnja 2018.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE	2
2.1. Računalna radiografija	4
3. PARAMETRI KVALITETE SLIKOVNIH ZAPISA	6
3.1. Prostorna rezolucija – SR_b	6
3.2. Odnos signal/šum - SNR	7
3.3. Odnos kontrast/šum - CNR	9
3.4. Radiografska osjetljivost	10
4. OPIS PRAKTIČNOG DIJELA RADA	12
5. PRAKTIČNI DIO	13
5.1. Uzorci i ispitna oprema	13
5.2. Postavke snimanja	17
5.2.1. Klasifikacija radiografskih tehnika i opći zahtjevi	17
5.2.2. Plan ispitivanja	18
5.2.3. Vrste i pozicioniranje indikatora kvalitete slike	19
5.2.4. Izbor napona na rendgenskoj cijevi	20
5.2.5. Udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka	22
5.2.6. Maksimalna površina jedne ekspozicije	23
5.2.7. Usporedba snimanih parametara i zahtjeva norme	26
5.3. Analiza slikovnih zapisa	28
5.3.1. Minimalni zahtjevi zaslona za analizu slikovnih zapisa	28
5.3.2. Postupak evaluacije parametara kvalitete	29
5.3.2.1. Određivanje prostorne rezolucije	29
5.3.2.2. Određivanje normaliziranog odnosa signal/šum	33
5.3.2.3. Određivanje radiografske osjetljivosti	35
5.3.2.4. Određivanje odnosa kontrast/šum	36
5.3.3. Prikaz rezultata	37
5.3.3.1. SR_b – prikaz rezultata	38
5.3.3.2. SNR – prikaz rezultata	42
5.3.3.3. Radiografska osjetljivost – prikaz rezultata	45
5.3.3.4. CNR – prikaz rezultata	47
5.3.4. Osvrt na rezultate ispitivanja	50
5.4. Razine prihvatljivosti za zavarene spojeve	51
5.4.1. Postupak određivanja veličine nepravilnosti	52

5.4.2. Prikaz i analiza rezultata	53
6. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57
PRILOZI	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Princip radiografskog ispitivanja snimanjem na film [1]	3
Slika 2.	Princip rada računalne radiografije [3]	5
Slika 3.	Dinamički raspon slikovnih ploča i radiografskog filma [2]	5
Slika 4.	"Duplex" žičani indikator	7
Slika 5.	Vrijednosti sivih tonova izmjerenih na „duplex“ indikatoru	7
Slika 6.	Graf devijacije intenziteta piksela [2]	8
Slika 7.	Usporedba manjeg i većeg kontrasta [2]	9
Slika 8.	Utjecaj šuma na kvalitetu slikovnog zapisa [2]	10
Slika 9.	Jednostruki žičani indikator [4]	11
Slika 10.	Ispitni uzorak Al 3	13
Slika 11.	Ispitni uzorak Al 12	14
Slika 12.	Ispitni uzorci Fe 3 – A (lijevo) i Fe 3 – B (desno)	14
Slika 13.	Ispitni uzorak Fe 20	15
Slika 14.	Izvori zračenja korišteni tijekom snimanja uzoraka	16
Slika 15.	Oprema za skeniranje slikovnih ploča i analizu slikovnih zapisa	16
Slika 16.	Plan ispitivanja za sučeljeni zavareni spoj dviju ploča [5]	18
Slika 17.	Odabir maksimalnog napona ispitivanja ovisno o vrsti materijala i debljini prozračivanja [5]	21
Slika 18.	Utjecaj udaljenosti izvora zračenja od objekta (f) i udaljenosti objekta od detektora (b) na ostvarenu neoštrinu [1]	22
Slika 19.	Princip izračuna maksimalne površine jedne ekspozicije	24
Slika 20.	Opcija linearizacije i aktivacije grafa "duplex" indikatora korištenjem softverskog paketa „Starrview“	30
Slika 21.	Analiza vrijednosti sivih tonova mjerenih na „duplex“ indikatoru softverskim paketom "Starrview"	30
Slika 22.	Prikaz analize para žice koji zadovoljava (gore) i koji ne zadovoljava (dolje) za uzorak Al 3	31
Slika 23.	Prikaz opcije "profiler" te način mjerenje sedla softverskim paketom „ISee“	32
Slika 24.	Definicija parametara za izračun postotka sedla formulom (8) [5]	32
Slika 25.	Način mjerenja i područje od interesa za određivanje vrijednosti SNR-a softverskim paketom „Starrview“	34
Slika 26.	Tablica vrijednosti SNR-a za odabrana područja od interesa izmjerena softverom „Starrview“	34
Slika 27.	Određivanje parametra SNR u programu „ISee“	35
Slika 28.	Analiza jednostrukog žičanog indikatora podešavanjem kontrasta	36
Slika 29.	Princip mjerenja s ciljem određivanja parametra CNR	37
Slika 30.	Grafikon usporedbe rezultata postignute prostorne rezolucije - SR_b	41
Slika 31.	Grafikon usporedbe rezultata normaliziranog odnosa signal/šum - SNR_n	45
Slika 32.	Grafikon usporedbe rezultata postignute radiografske osjetljivosti	47
Slika 33.	Grafikon usporedbe rezultata odnosa kontrast/šum	49
Slika 34.	Kalibracija veličine piksela	52
Slika 35.	Mjerenje dimenzije nepravilnosti	53
Slika 36.	Slikovni zapis uzorka Al 3 i lokacija ispitane nepravilnosti	53
Slika 37.	Slikovni zapis uzorka Al 12 i lokacija ispitane nepravilnosti	54
Slika 38.	Slikovni zapis uzorka Fe 3 i lokacija ispitane nepravilnosti	54

Slika 39. Slikovni zapis uzorka Fe 20.....	55
--	----

POPIS TABLICA

Tablica 1. Odabir klase radiografskog ispitivanja, priprema površine i označavanje uzoraka.....	17
Tablica 2. Postavljanje indikatora kvalitete	19
Tablica 3. Usporedba zahtjeva norme te odabranih napona snimanja	21
Tablica 4. Minimalna udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka.....	23
Tablica 5. Maksimalan promjer površine ekspozicije u odnosu na udaljenosti izvora zračenja od ispitnog uzorka	25
Tablica 6. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Al 3.....	26
Tablica 7. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Al 12.....	26
Tablica 8. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Fe 3.....	27
Tablica 9. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Fe 20.....	27
Tablica 10. Karakteristike monitora za analizu slikovnih zapisa.....	28
Tablica 11. Minimalni zahtjevi norme za prostornu rezoluciju za klasu B radiografskih ispitivanja [5]	38
Tablica 12. Rezultati parametra SR_b za uzorak Al 3	39
Tablica 13. Rezultati parametra SR_b za uzorak Al 12	39
Tablica 14. Rezultati parametra SR_b za uzorak Fe 3	40
Tablica 15. Rezultati parametra SR_b za uzorak Fe 20	40
Tablica 16. Minimalni zahtjevi norme za normalizirani odnos signal/šum za klasu B radiografskih ispitivanja za čelik [5]	42
Tablica 17. Minimalni zahtjevi norme za normalizirani odnos signal/šum za klasu B radiografskih ispitivanja za aluminij [5].....	42
Tablica 18. Rezultati normaliziranog odnosa signal/šum izmjeren na lineariziranim datotekama	43
Tablica 19. Rezultati normaliziranog odnosa signal/šum izmjeren na nelineariziranim datotekama	44
Tablica 20. Minimalni zahtjevi vrijednosti jednostrukog žičanog indikatora s obzirom na nominalnu debljinu uzorka [5]	46
Tablica 21. Rezultati postignute radiografske osjetljivosti.....	46
Tablica 22. Rezultati mjerenja odnosa kontrast/šum - CNR.....	48
Tablica 23. Izmjerene dimenzije nasumično odabranih nepravilnosti	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	mm	Udaljenost uzorka od detektora
CNR	-	Odnos kontrast/šum (eng. contrast to noise ratio)
d	mm	Veličina fokusa
D	mm	Maksimalan promjer ekspozicije
f	mm	Udaljenost fokusa od uzorka
f_{\min}	mm	Minimalna udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka
I	-	Intenzitet piksela
I_0	-	Srednja vrijednost intenziteta piksela
I_{pozadine}	-	Srednja vrijednost intenziteta piksela pozadinskog signala
I_{signala}	-	Srednja vrijednost intenziteta piksela signala
IQI	-	Indikator kvalitete slike (eng. image quality indicator)
ROI	-	Područje od interesa (eng. region of interest)
SNR	-	Odnos signal/šum (eng. signal to noise ratio)
SNR_n	-	Normalizirani odnos signal/šum
SR_b	mm	Prostorna rezolucija (eng. basic spatial resolution)
β	°	Kut snimanja rendgenskog uređaja
st. dev _{prosječna}	-	Prosječna standardna devijacija osnovnog i pozadinskog signala
t	mm	Debljina materijala
t'	mm	Debljina prozračivanja na rubovima zračenja
u	mm	Neoštrina
U	kV	Napon na rendgenskoj cijevi
w	mm	Debljina prozračivanja
σ (st. dev _{šuma})	-	Standardna devijacija intenziteta piksela (šum)

SAŽETAK

Računalna radiografija jedna je od metoda nerazornih ispitivanja koja se često primjenjuje prilikom ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva. U teoretskom dijelu rada prikazani su osnovni principi ispitivanja računalnom radiografijom te objašnjeni parametri kvalitete slikovnih zapisa.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je odabrati osnovne parametre ekspozicije te provesti analizu dobivenih slikovnih zapisa prema zahtjevima referentne norme. Izmjereni parametri kvalitete slikovnih zapisa u konačnici su uspoređeni s minimalnim zahtjevima referentne norme.

U radu su također uspoređene izmjerene veličine nepravilnosti u zavarenom spoju s obzirom na zahtjeve definirane referentnom normom i za odabranu razinu prihvatljivosti.

Ključne riječi: računalna radiografija, nerazorna ispitivanja zavarenih spojeva, kvaliteta slikovnih zapisa, ISO 17636 – 2, razine prihvatljivosti za radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva

SUMMARY

Computed radiography, as a method of non – destructive testing, is often used as weld quality inspection. Through theoretic part of the thesis, the main principles of computed radiography testing are shown and image quality parameters are explained.

The main idea of the practical part of thesis was to determine basic exposition parameters and to analyze obtained images according to technical requirements of the reference standards. Obtained image quality parameters are then compared with minimal reference standards.

Measured sizes of imperfections detected in welds are also compared with minimal reference standards for proper acceptance level.

Key words: computed radiography, non – destructive testing of welds, image quality, ISO 17636 – 2, acceptance levels for radiographic testing of welds

1. UVOD

Zahtjevi za visokom kvalitetom i brzinom proizvodnje, uz što manje ukupne troškove iste, iz dana u dan sve su stroži, a napredak i razvoj tehnika kontrole kvalitete ne izostaju. Iz tog je razloga računalna radiografija jedna od često primijenjenih metoda nerazornih ispitivanja kojom se dobiva trajni zapis snimanih uzoraka, uz daleko kraće vrijeme skeniranja slikovnih ploča u odnosu na klasično razvijanje filmova. Iako se koristi računalna obrada slikovnih zapisa, tehnika računalne radiografije također zahtjeva evaluaciju parametara kvalitete slike, odnosno postignute radiografske osjetljivosti.

Kvaliteta digitalnog slikovnog zapisa uvjetovana je brojnim parametrima počevši od postavki snimanja i skeniranja pa sve do same analize slike. Iz tog je razloga, pridržavanje tehničkih uputa i smjernica od velike važnosti za postizanje kvalitetnog digitalnog zapisa odnosno ispunjavanje zahtjeva referentnih normi. Analiza slikovnih zapisa, odnosno evaluacija parametara kvalitete u direktnoj je vezi sa postignutom neoštrinom, intenzitetom piksela te radiografskom osjetljivošću što u konačnici predstavlja inženjerski pristup ocjenjivanja kvalitete slikovnih zapisa te numeričku usporedivost sa zahtjevima referentnih normi.

Tehničke upute i smjernice postupka pripreme, snimanja, analize te u konačnici zahtjevi kvalitete slikovnih zapisa, definirani su normom [5] za nerazorno ispitivanje zavarenih spojeva za tehnike s digitalnim detektorima.

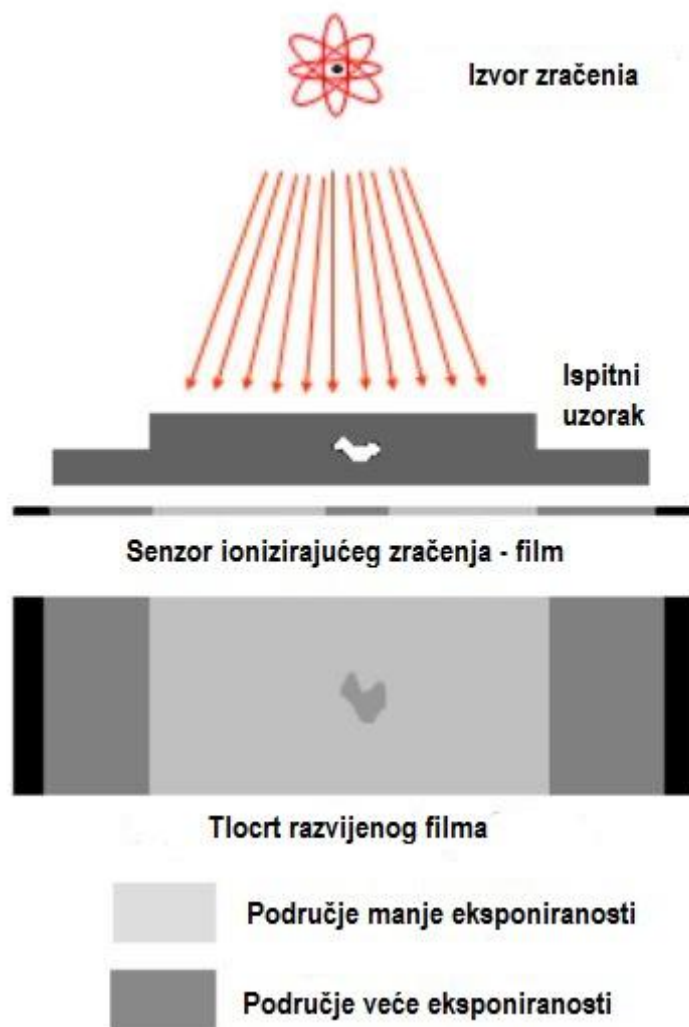
U svrhu ispitivanja zahtjeva norme te u konačnici ostvarivanja minimalno potrebnih vrijednosti parametara kvalitete slikovnih zapisa, ispitani su uzorci dvije vrste materijala, aluminij i čelik, u određenom rasponu debljina.

2. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE

Radiografsko ispitivanje jedno je od najrasprostranjenijih i široko primijenjenih metoda nerazornih ispitivanja. Glavni princip radiografije temelji se na prolasku elektromagnetskog zračenja kroz ispitni materijal, u većem ili manjem intenzitetu ovisno o vrsti, dimenzijama i homogenosti materijala, te njegove detekcije na senzoru ionizirajućeg zračenja. Zabilježenim vrijednostima zračenja na senzoru se formira latentna slika. [1, 2]

Kao izvori zračenja u industrijskoj radiografiji koriste se rendgenski uređaji te radioaktivni izotopi. Radioaktivni izotopi uobičajeno se koriste na terenskim ispitivanjima iz razloga veće mobilnosti, fleksibilnosti i neovisnosti od vanjskog izvora struje (ne koriste ga) te su pogodniji za ispitivanje uzoraka većih debljina (razlog tome je karakteristični spektar zračenja korištenih izotopa). Princip rada rendgenskog uređaja temelji se na rendgenskoj cijevi, sastavljenoj od anode i katode utaljene u staklenu ili keramičku cijev u kojoj je vakuum [2]. Elektroni odaslati s katode velikom brzinom udaraju u anodu, gdje prilikom naglog kočenja te interakcije s atomima anode predaju svoju energiju potrebnu za stvaranje zračenja.

Prilikom radiografskog ispitivanja, ispitni objekt postavlja se između izvora te detektora ionizirajućeg zračenja. Zračenje koje prolazi kroz objekt eksponira detektor zračenja u određenoj mjeri. Kako na području veće debljine ili materijala manje propusnosti zračenja očitavamo manji intenzitet zračenja, na slikovnom zapisu su takva područja vidljiva kao „svjetlija“ – područja manje eksponiranosti. Iz tog je razloga varijacija intenziteta piksela proporcionalna količini zračenja koje dopire do senzora. Uz mnoštvo prednosti koje metoda pruža, njena primjena nerijetko izostaje prilikom ispitivanja zavarenih spojeva. Slikom 1 prikazan je osnovni princip radiografskog ispitivanja snimanjem na film.



Slika 1. Princip radiografskog ispitivanja snimanjem na film [1]

Glavne karakteristike radiografskog ispitivanja su [1]:

- mogućnost detekcije površinskih i unutrašnjih nepravilnosti uzorka,
- izrada trajnog zapisa ispitivanja,
- mogućnost detekcije značajnijih varijacija u kompoziciji materijala,
- mogućnost ispitivanja „skrivenih“ područja (nije potreban direktan pristup površini),
- opasnost radioaktivnog zračenja za ljudsko zdravlje,
- vjerojatnost detekcije nepravilnosti ovisna o njenoj orijentaciji.

2.1. Računalna radiografija

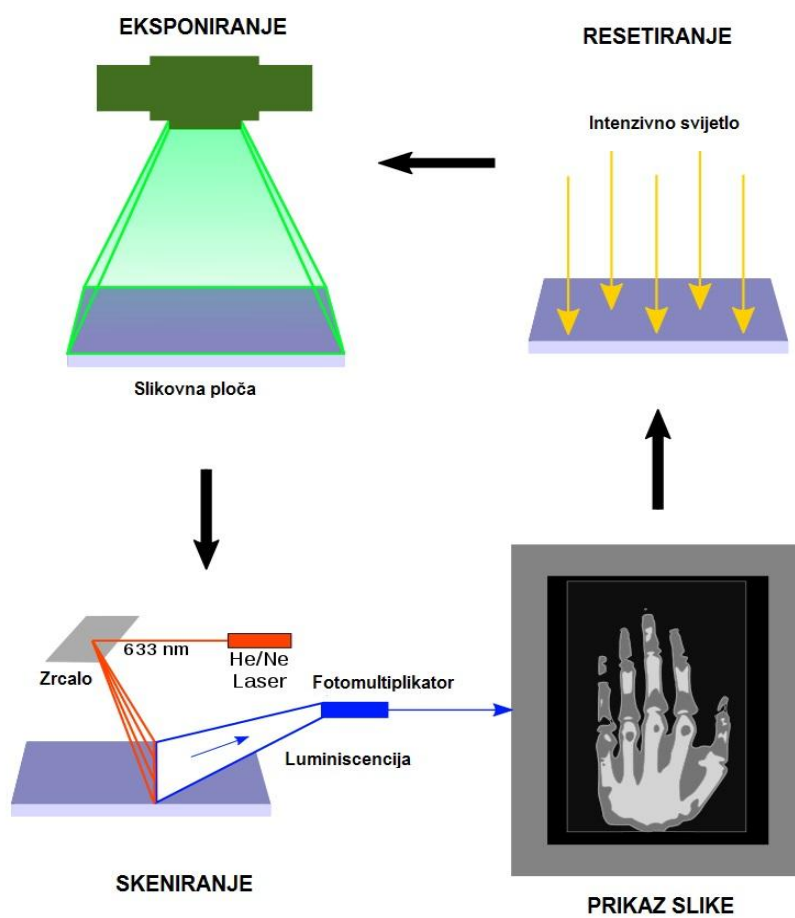
Za razliku od konvencionalnog radiografskog snimanja na film, računalna radiografija predstavlja bržu i jednostavniju metodu ispitivanja te je kao takva sve češće primijenjena.

Osnovne komponente sustava za računalnu radiografiju su [2]:

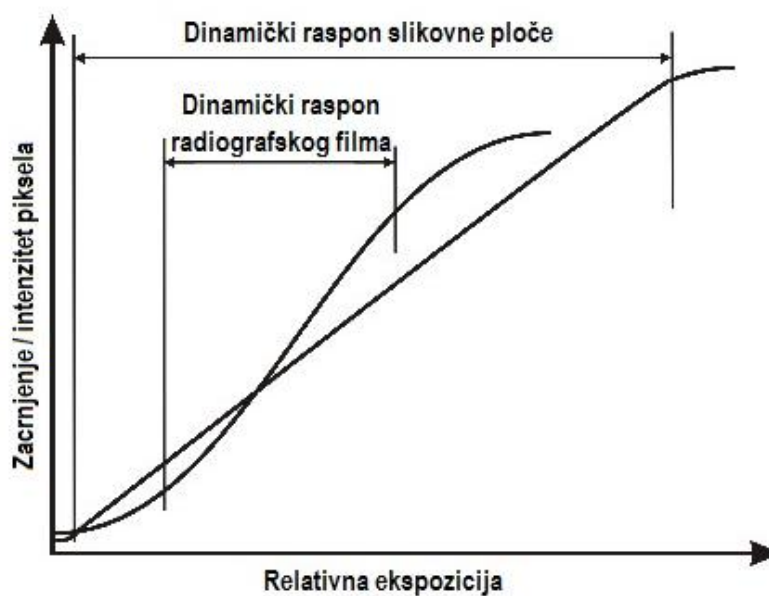
- izvor ionizirajućeg zračenja,
- slikovna ploča,
- skener za računalnu radiografiju,
- računalo s pripadajućim ekranom za analizu i interpretaciju.

Princip postavki snimanja, izvori zračenja te utjecaj veličine fokusa, kvalitete i energije zračenja na kvalitetu radiografske slike, jednaki su u odnosu na klasičnu industrijsku radiografiju snimanjem na film. Za razliku od korištenja filma kao detektora zračenja te njegovog kemijskog razvijanja u specijaliziranim komorama, računalna radiografija podrazumijeva upotrebu slikovnih ploča. Uloga slikovnih ploča jednaka je onoj radiografskog filma – stvoriti latentnu sliku ovisno o promjenama intenziteta zračenja prilikom prolaska kroz ispitni objekt. Princip rada slikovnih ploča temelji se na kemijskom sastavu iste odnosno fotoosjetljivom sloju na ionizirajuće zračenje. Prilikom eksponiranja slikovne ploče dolazi do pobuđivanja elektrona europija unutar navedenog sloja – dolazi do ionizacije. Elektroni na taj način prelaze u viši energetske nivo te ostaju „zarobljeni“ u fluorohalidnim prazninama. [2, 3] Eksponirana slikovna ploča zatim se skenira na skeneru za računalnu radiografiju. Skeniranje laserskom zrakom rezultira vraćanjem elektrona na prvotni energetske nivo pri čemu dolazi do emisije vidljivog svjetla – luminiscencije. Analogni svjetlosni signal se tada preko fotomultiplikatora i digitalno-analognog pretvarača pretvara u digitalni zapis koji je moguće analizirati na monitoru [2, 3]. Princip rada računalne radiografije i upotrebe slikovnih ploča prikazan je slikom 2.

Dinamički raspon slikovnih ploča daleko je šireg područja od onog radiografskog filma, što za posljedicu ima manji utjecaj relativne ekspozicije na kontrast slikovnog zapisa. Iz navedenog je lako zaključiti kako je operateru lakše odrediti ekspoziciju u odnosu na radiografski film, međutim, zbog navedenog šireg dinamičkog raspona slikovne ploče, ostvariti će se manji kontrast. Slikom 3 prikazana je usporedba dinamičkog raspona slikovnih ploča te radiografskog filma.



Slika 2. Princip rada računalne radiografije [3]



Slika 3. Dinamički raspon slikovnih ploča i radiografskog filma [2]

3. PARAMETRI KVALITETE SLIKOVNIH ZAPISA

Kako u računalnoj radiografiji kvaliteta radiografske slike ovisi o više parametara, kao što su napon na rendgenskoj cijevi (energija zračenja), vrijeme trajanja te struja ekspozicije, debljina i vrsta osnovnog materijala, vrsti slikovne ploče te parametrima skeniranja, od velike je važnosti pravilno evaluirati parametre koji, svaki na svoj način, definiraju konačnu kvalitetu slikovnog zapisa. S obzirom da je dobiveni slikovni zapis u digitalnom obliku te se isti analizira na monitoru (za razliku od radiografskog filma, gdje se isti kemijski razvija), zahtjevi za kvalitetom drugačiji su od onih kod primjene radiografskog filma.

Osnovni parametri za evaluaciju kvalitete slikovnih zapisa su:

- SR_b – prostorna rezolucija (eng. basic spatial resolution),
- SNR – odnos signal / šum (eng. signal to noise ratio) te SNR_n – normalizirani odnos signal / šum,
- CNR – odnos kontrast / šum (eng. contrast to noise ratio),
- postignuta radiografska osjetljivost.

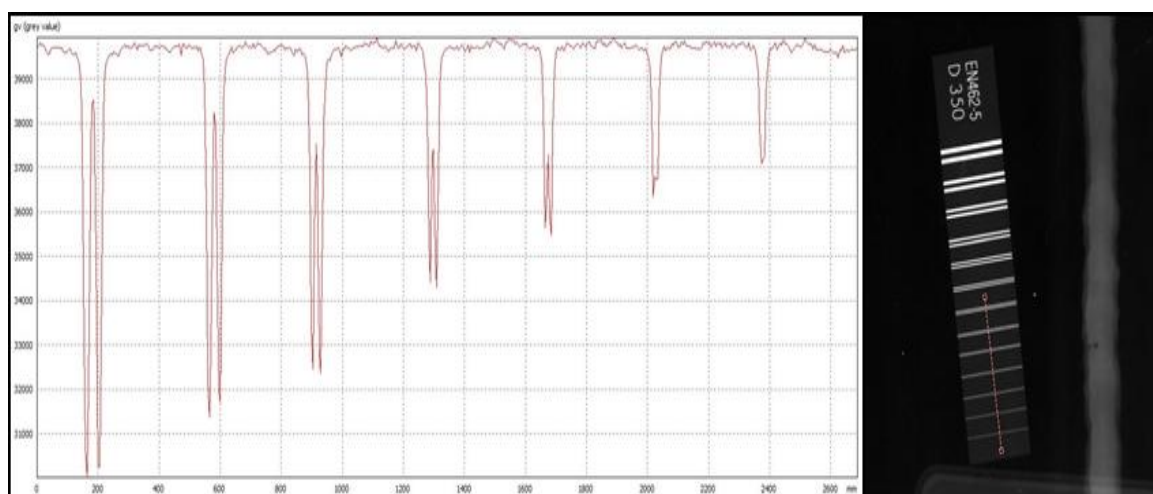
3.1. Prostorna rezolucija – SR_b

Jedan od najvažnijih faktora koji utječu na kvalitetu slikovnog zapisa je neoština. Manja neoština slikovnog zapisa znači da je promjena intenziteta piksela uočljiva u „oštrim“ konturama, negoli u mutnim obrisima. S obzirom na navedeno, od velike je važnosti prilikom analize slikovnog zapisa odrediti postignutu neoštrinu, odnosno postignutu prostornu rezoluciju. U tu svrhu, na objekt ispitivanja (sa strane izvora zračenja) postavlja se indikator s dvostrukim žicama (eng. duplex indicator). „Duplex“ indikator sastoji se od seta 13 parova žica u polimernoj podlozi, a razmak između žica jednak je njihovom promjeru. Indikator služi kako bi se odredila postignuta prostorna rezolucija na način da se utvrdi najmanji par žica čije konture još uvijek raspoznavamo kao dvije odvojene žice (relativna vrijednost intenziteta piksela „sedla“ u odnosu na vrhove, prikazanih grafom na slici 5, ne smije biti manja od 20 %), a vrijednost postignute rezolucije jednaka je promjeru žice, koja je određena prvim parom koji ne ispunjava navedeni uvjet.“ Duplex“ žičani indikator prikazan je slikom 4.



Slika 4. "Duplex" žičani indikator

Analiza i mjerenja ostvarene prostorne rezolucije – SR_b -a, provode se u za to predviđenom softveru. Kao što je već spomenuto, relativna vrijednost intenziteta piksela „sedla“ u odnosu na vrhove ne smije biti manja od 20 %. Slikom 5 prikazan je izgled vrijednosti sivih tonova za spomenuto mjerenje pri čemu je lako uočiti proporcionalno smanjivanje „sedla“ sa debljinom i razmakom žice.



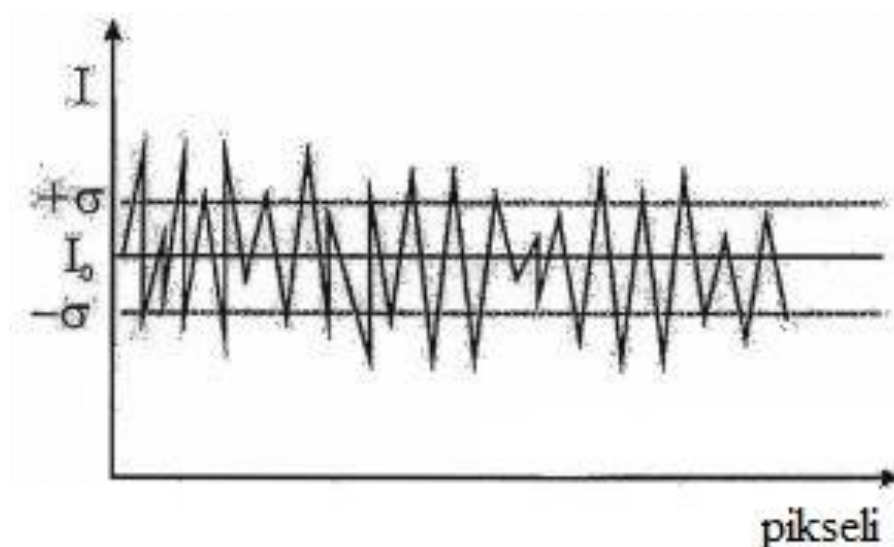
Slika 5. Vrijednosti sivih tonova izmjerenih na „duplex“ indikatoru

3.2. Odnos signal/šum - SNR

Kako je već objašnjeno u prijašnjim poglavljima, tijekom procesa radiografskog snimanja, elektromagnetsko zračenje u određenoj mjeri prolazi kroz materijal te podiže elektrone u slikovnoj ploči na viši energetske nivo. Iz navedenog se može zaključiti kako svako područje slikovnog zapisa – piksel, gdje je debljina materijala ista, a struktura homogena, ima jednaku vrijednost intenziteta piksela. Međutim, prilikom procesa snimanja i

skeniranja slikovne ploče dolazi do pojave šuma koji uzrokuje devijacije vrijednosti intenziteta piksela. Šum je posljedica strukture slikovne ploče, rasipanja i elektronskog pojačavanja intenziteta piksela prilikom skeniranja, hrapavosti površine ispitnog uzorka i sl., što znači da kao takav loše utječe na kvalitetu slikovnog zapisa te bi njegova standardna devijacija trebala biti što manja. Slikom 6 prikazan je graf devijacije vrijednosti signala (intenziteta piksela), pri čemu je:

- I – intenzitet piksela,
- I_0 – srednja vrijednost intenziteta piksela,
- σ – standardna devijacija intenziteta piksela (šum).



Slika 6. Graf devijacije intenziteta piksela [2]

Iz navedenih razloga, prilikom analize slikovnih zapisa provodi se mjerenje parametra SNR koji se definira kao omjer srednje vrijednosti intenziteta piksela signala (I_{signala}) te standardne devijacije šuma prema formuli (1)

$$SNR = \frac{I_{\text{signala}}}{st. dev_{\text{suma}}} \quad (1)$$

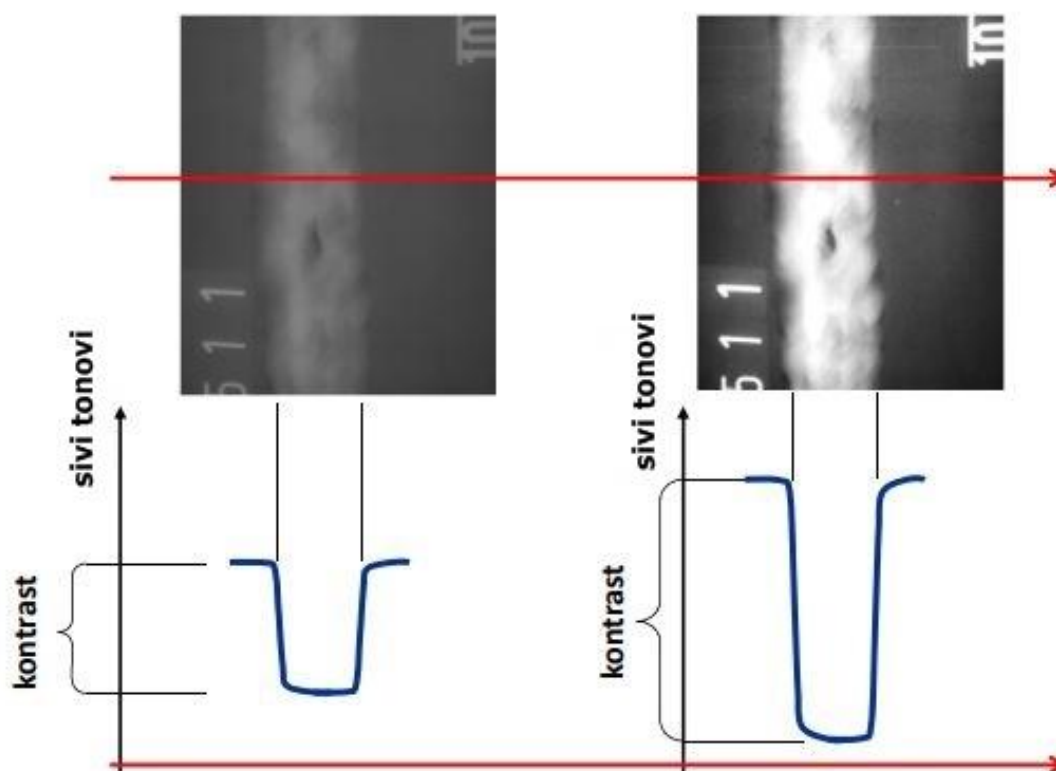
Za slične uvjete ekspozicije, uređaji manje oštine ostvaruju veće vrijednosti SNR-a negoli uređaji veće oštine, međutim, uređaji manje oštine ostvaruju manje mogućnosti detekcije sitnih nepravilnosti. Iz tog je razloga izmjereni SNR potrebno normalizirati postignutom prostornom rezolucijom prema formuli 2:

$$SNR_n = \frac{SNR \times 0,0886}{SR_b} \quad (2)$$

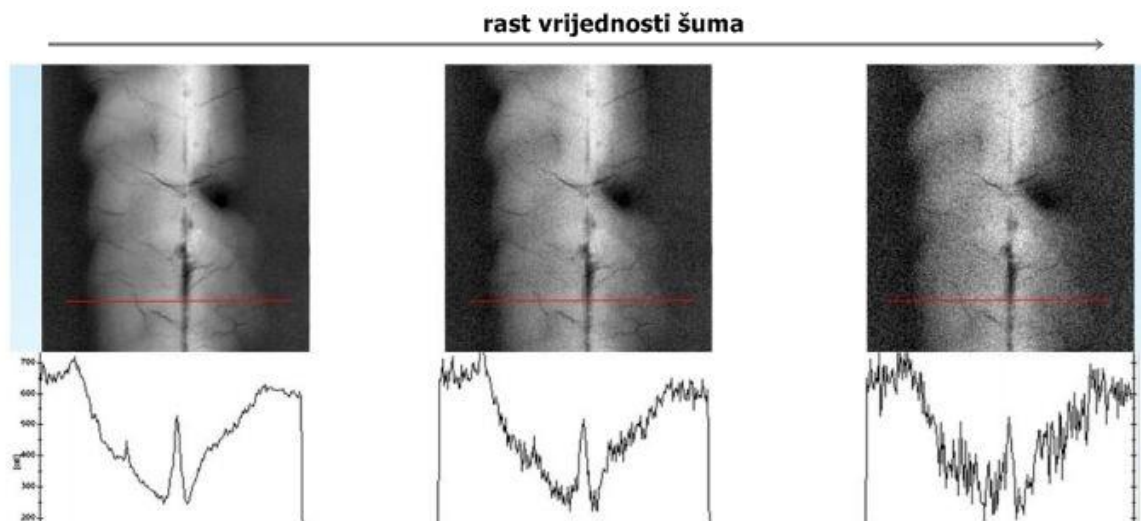
3.3. Odnos kontrast/šum - CNR

Tijekom analize slikovnog zapisa snimanog zavarenog spoja, nepravilnosti koje se žele otkriti u direktnoj su vezi s intenzitetom piksela ostvarenim na tom području. Manji ili veći intenzitet piksela u odnosu na okolno područje otkriva određenu nepravilnost – ostvaren je dovoljan kontrast kako bismo istu mogli uočiti. Međutim, značajne varijacije osnovnog intenziteta piksela (pozadine), odnosno već spomenuti šum, mogu uzrokovati nemogućnost detekcije nepravilnosti koji možemo promatrati kao signal odstupanja. S obzirom na navedeno, ostvaren dobar kontrast slikovnog zapisa svejedno ne mora značiti laku detekciju nepravilnosti iz razloga što je više vrijednosti šuma mogu „pokriti“.

Slikom 7 prikazana je razlika između manjeg postignutog kontrasta (lijevo) te većeg postignutog kontrasta (desno). Na slici 8 dana je usporedba utjecaja nižih i viših ostvarenih vrijednosti šuma na kvalitetu slikovnog zapisa.



Slika 7. Usporedba manjeg i većeg kontrasta [2]



Slika 8. Utjecaj šuma na kvalitetu slikovnog zapisa [2]

Kako bismo, s obzirom na navedeni problem, mogli definirati ostvaren kontrast, potrebno je ocijeniti parametar omjera kontrasta i šuma prema formuli (3), pri čemu su:

- I_{signala} – srednja vrijednost intenziteta piksela signala,
- I_{pozadine} – srednja vrijednost intenziteta piksela pozadinskog signala,
- $\text{st.dev}_{\text{prosječna}}$ – prosječna standardna devijacija šuma.

$$CNR = \frac{|I_{\text{signala}} - I_{\text{pozadine}}|}{\text{st.dev}_{\text{prosječna}}} \quad (3)$$

3.4. Radiografska osjetljivost

S ciljem što lakšeg i boljeg utvrđivanja radiografske osjetljivosti, pri ispitivanju zavarenih spojeva koriste se jednostruki žičani indikatori. Navedeni indikatori sastoje se od 7 žica različitih debljina, od veće prema manjoj debljini, a najtanja žica koja je još uvijek vidljiva predstavlja postignutu radiografsku osjetljivost [4].

S obzirom kako su posljednje vidljive žice uglavnom uočljive isprekidano, posljednja vidljiva žica smatra se ona kod koje je moguće uočiti 10 mm neprekidne duljine. Često se navedena osjetljivost preračunava i prezentira kao postotak prema formuli 4 [4]:

$$S (\text{osjetljivost}) = \frac{\text{promjer najtanje vidljive žice}}{\text{ukupna debljina prozračenog uzorka}} * 100 \% \quad (4)$$

Slikom 9 prikazan je jednostruki žičani indikator. Olovne oznake iznad žica predstavljaju numerički broj žice (na prikazanoj slici to je broj 10), koji označava žicu najveće debljine u „paketu“, te oznaka materijala za koji je potrebno koristiti indikator .



Slika 9. Jednostruki žičani indikator [4]

4. OPIS PRAKTIČNOG DIJELA RADA

Zahtjevi norme ISO 17636 – 2 za radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva s upotrebom digitalnih detektora jasno definiraju postavke parametara snimanja te analizu kvalitete slikovnih zapisa s ciljem ostvarivanja minimalno normirane kvalitete slikovnih zapisa. S obzirom na navedene zahtjeve, provedena su radiografska ispitivanja za dvije vrste odabranoga materijala te za odabrani raspon debljina osnovnog materijala. Snimani su uzorci aluminija debljine 3 i 12 mm te čelika debljine 3 i 20 mm. S obzirom da se povećanjem debljine prozračivanog uzorka smanjuje osjetljivost odnosno kvaliteta slikovnog zapisa odabrani su uzorci manje i veće debljine s ciljem usporedbe dobivenih rezultata i konačne kvalitete slikovnih zapisa.

Na konačnu kvalitetu slikovnog zapisa od velikog je utjecaja izbor parametara snimanja koji su u ovom eksperimentalnom radu postavljeni s obzirom na zahtjeve navedene norme. U tu svrhu definirani su osnovni parametri snimanja i skeniranja.

Osnovni parametri snimanja:

- napon na rendgenskoj cijevi,
- struja ekspozicije,
- vrijeme ekspozicije,
- udaljenost fokusa od ispitnog uzorka.

Osnovni parametri skeniranja:

- napon na fotomultiplikatoru,
- snaga lasera,
- rezolucija skeniranja.

Parametri snimanja, plan ispitivanja, postavljanje indikatora te analiza slikovnih zapisa definirani su spomenutom normom dok su odabrani parametri skeniranja zadržani u optimalnom području.

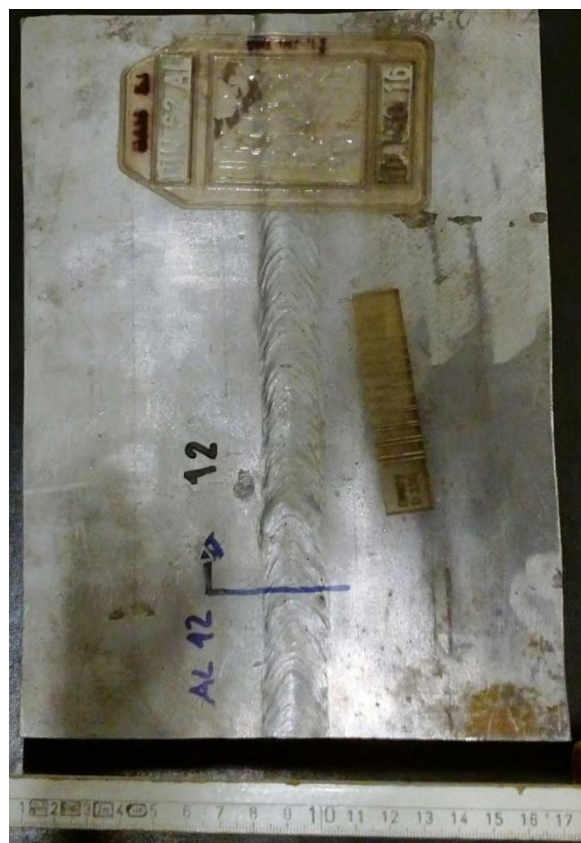
5. PRAKTIČNI DIO

5.1. Uzorci i ispitna oprema

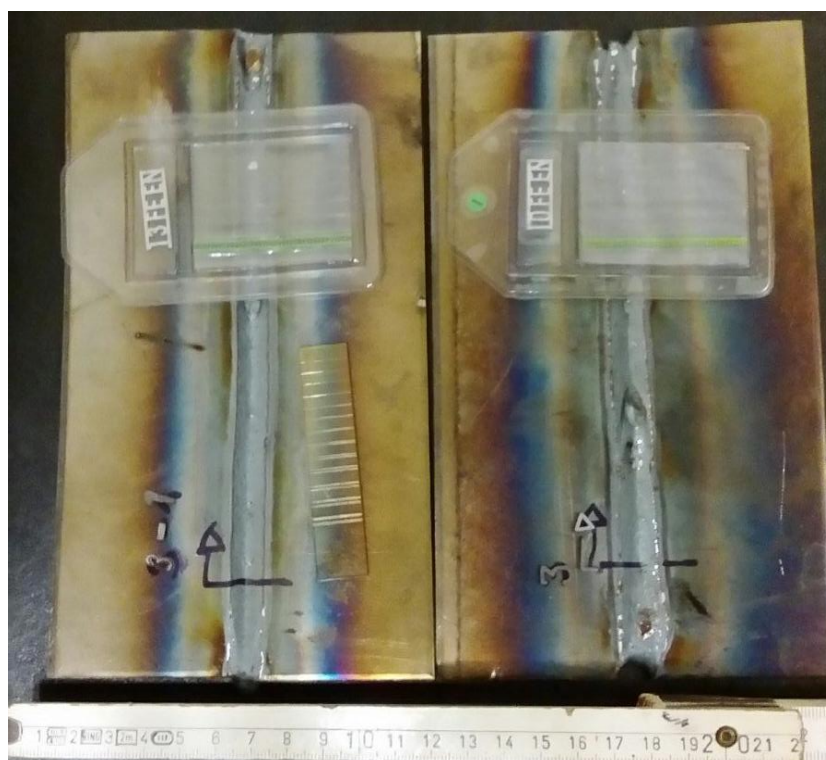
S ciljem mogućnosti usporedbe rezultata, odabrani su zavareni uzorci sučeljenog spoja dvije ravne ploče kako bi se pojednostavilo radiografsko ispitivanje. Slikama 10, 11, 12 i 13 prikazani su uzorci postavljeni za ispitivanje.



Slika 10. Ispitni uzorak AL 3



Slika 11. Ispitni uzorak Al 12



Slika 12. Ispitni uzorci Fe 3 – A (lijevo) i Fe 3 – B (desno)



Slika 13. Ispitni uzorak Fe 20

Tijekom ispitivanja korištena su dva izvora zračenja iz potrebe za većim, odnosno manjim energijama zračenja. Slikom 14 prikazani su korišteni izvori zračenja, dok je na slici 15 prikazana oprema za skeniranje slikovnih ploča te računalno i monitor za analizu kvalitete slikovnih zapisa. Analiza parametara kvalitete slikovnog zapisa SR_b , SNR i radiografske osjetljivosti za uzorak Fe 3 provedena je na uzorku Fe 3 – A, dok je parametar CNR analiziran na uzorku Fe 3 – B. Sva snimanja provedena su upotrebom „Flex XL Blue 5537“ slikovne ploče visoke rezolucije tvrtke „Carestream Industrex“. Oznake uzoraka odnose se na odabrani materijal i debljinu uzorka (npr. Fe 3 – čelični uzorak 3 mm).



Slika 14. Izvori zračenja korišteni tijekom snimanja uzoraka



Slika 15. Oprema za skeniranje slikovnih ploča i analizu slikovnih zapisa

5.2. Postavke snimanja

S obzirom da konačna kvaliteta slikovnih zapisa značajno ovisi o postavljenim parametrima snimanja, u tu svrhu odabrani su parametri definirani normom ISO 17636 - 2.

5.2.1. Klasifikacija radiografskih tehnika i opći zahtjevi

Radiografske tehnike podijeljene su u dvije klase:

- klasa A – osnovne tehnike,
- klasa B – napredne tehnike.

Radiografske tehnike klase B koriste se u slučajevima kada tehnike klase A ne postižu dovoljnu osjetljivost. S obzirom da je u radu potrebno analizirati mogućnost detekcije što sitnijih nepravilnosti, **odabrana je klasa B.**

U slučaju gdje površinske nepravilnosti ili prevlake mogu izazivati lažne indikacije ili stvarati poteškoće u detekciji unutarnjih nepravilnosti (veći šum), površinu je potrebno brusiti, a prevlake odstraniti [5].

Prilikom ispitivanja, potrebno je označiti ispitni uzorak (smjer ispitivanja, vrstu materijala koji se ispituje, početni položaj i sl.) kako bi se lakše utvrdila topografska pripadnost uočenih nepravilnosti. Označavanje je potrebno izvoditi izvan zone interesa kako ne bi utjecalo na analizu slikovnih zapisa [5].

Tablicom 1 prikazani su provedeni zahtjevi norme dok su na slikama 10 – 13, u prethodnom poglavlju, prikazani uzorci s potrebnim označavanjem i stanjem površine.

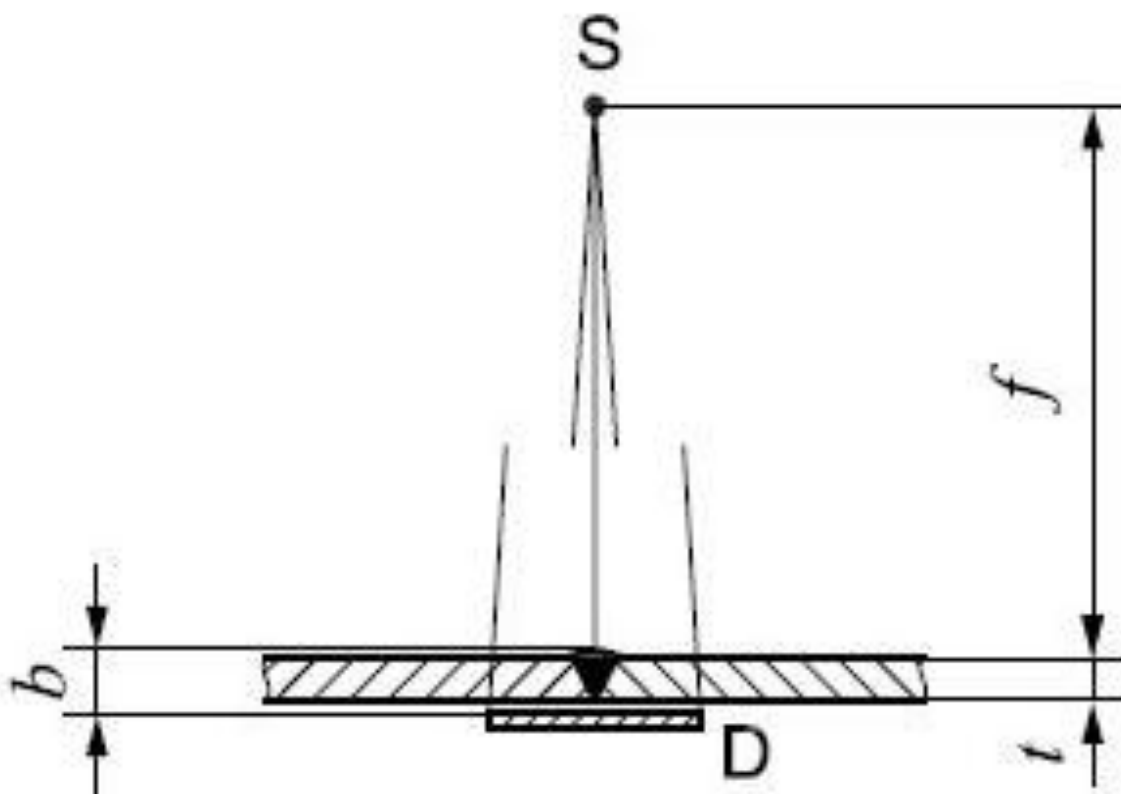
Tablica 1. Odabir klase radiografskog ispitivanja, priprema površine i označavanje uzoraka

Uzorak	Klasa radiografske tehnike	Priprema površine	Označavanje u skladu s normom
Al 3	B	Nije potrebna	DA
Al 12			
Fe 3			
Fe 20			

5.2.2. Plan ispitivanja

Plan ispitivanja za sučeljeni zavareni spoj dviju ploča (jednostruka stjenka, jednostruka slika) definiran normom ISO 17636 – 2 prikazan je na slici 16, pri čemu su:

- S –fokus,
- f – udaljenost fokusa od uzorka,
- t – debljina materijala,
- b – udaljenost uzorka od detektora,
- D – detektor (slikovna ploča).



Slika 16. Plan ispitivanja za sučeljeni zavareni spoj dviju ploča [5]

5.2.3. Vrste i pozicioniranje indikatora kvalitete slike

Kako bi se utvrdila kvaliteta slikovnih zapisa, prilikom ispitivanja korišteni su indikatori kvalitete slike (eng. IQI – image quality indicators):

- dvostruki žičani indikator – „duplex“ indikator,
- jednostruki žičani indikator – „single wire“ indikator.

„Duplex“ indikator korišten je u svrhu određivanja ostvarene oštine – neoštine dok je jednostruki žičani indikator korišten kako bi se utvrdila postignuta radiografska osjetljivost te u konačnici dobiveni rezultati mogli usporediti sa zahtjevima norme. Pozicioniranje navedenih indikatora izvodi se u skladu s normom [5] dok je provedeno pozicioniranje dano tablicom 2 i prikazano slikama 10 – 13 u prethodnom poglavlju.

U slučaju postavljanja „duplex“ indikatora na ispitni uzorak, određivanje postignute prostorne rezolucije odnosi se na slikovni zapis – na taj način određen je parametar SR_b^{image} . Postavljanjem indikatora na detektor, analizom slikovnog zapisa određuje se postignuta prostorna rezolucija detektora – na taj način određen je parametar $SR_b^{detector}$, prema normi [5], poglavlje „Annex C“. Prilikom ispitivanja svih uzoraka, navedeni „duplex“ indikator postavljen je na ispitne uzorke te je određen parametar SR_b^{image} . Također, „duplex“ indikator potrebno je zakrenuti za nekoliko stupnjeva (2° - 5°) naprema liniji skeniranja kako ne bi došlo do preklapanja žica indikatora te spomenute linije skeniranja.

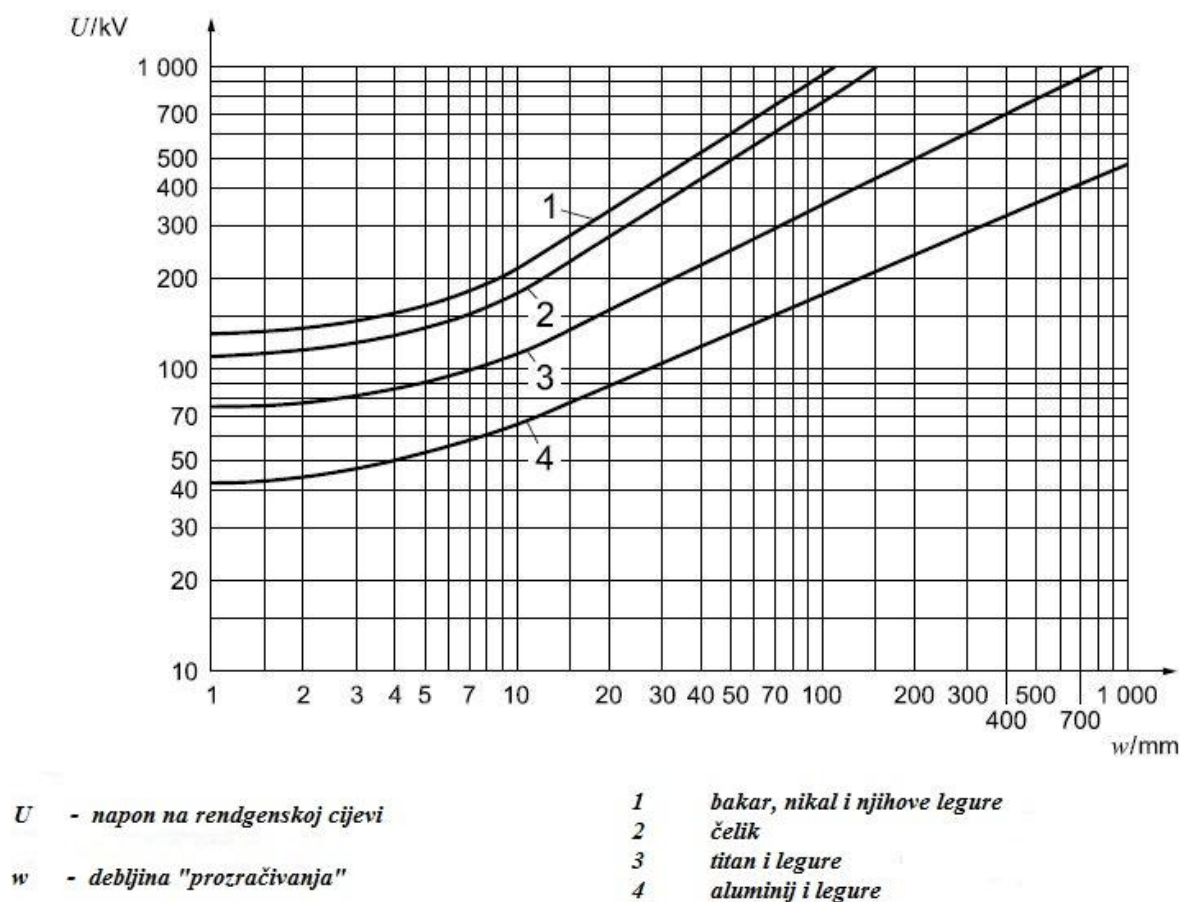
Jednostruki žičani indikator potrebno je postaviti sa strane izvora zračenja na ispitni uzorak, sa pozicioniranjem okomito na zavareni spoj, na način da se barem 10 % ukupne duljine žica nalazi u području jednolike vrijednosti intenziteta piksela (područje osnovnog metala neposredno uz zavareni spoj).

Tablica 2. Postavljanje indikatora kvalitete

Uzorak	Postavljanje "duplex" indikatora	Postavljanje jednostrukog žičanog indikatora
Al 3	Na osnovni materijal ispitnog uzorka, zakrenut za $2 - 5^\circ$ u odnosu na liniju skeniranja	Okomito na zavar, 10 mm duljine žice na području osnovnog materijala neposredno uz zavar
Al 12		
Fe 3		
Fe 20		

5.2.4. Izbor napona na rendgenskoj cijevi

Prilikom radiografskog ispitivanja, od velike je važnosti pravilan odabir energije zračenja. Odabir što manje energije zračenja povoljniji je od odabira većih vrijednosti iste, uz uvjet da je još uvijek moguće prozračiti ispitni uzorak. Razlog tome je što se velikim energijama zračenja smanjuje radiografska osjetljivost (u konkretnom slučaju zavarenih spojeva, smanjuje se mogućnost detekcije manjih nepravilnosti), što vrlo često može predstavljati značajniji problem. Slikom 17 prikazan je odabir napona rendgenske cijevi za uređaje do 1000 kV kao funkciju debljine i vrste ispitivanog materijala. Graf sa slike prikazuje odabir maksimalnog napona za radiografsko ispitivanje pomoću filma. Slikovne ploče sa nižim vrijednostima šuma („High definition“ slikovne ploče) mogu biti eksponirane energijom zračenja prikazanom slikom 17 (prema normi [5], poglavlje 7.2.1), međutim u određenim slučajevima odabir nižeg napona od maksimalno preporučenog normom može rezultirati višom kvalitetom slikovnog zapisa [5].



Slika 17. Odabir maksimalnog napona ispitivanja ovisno o vrsti materijala i debljini prozračivanja [5]

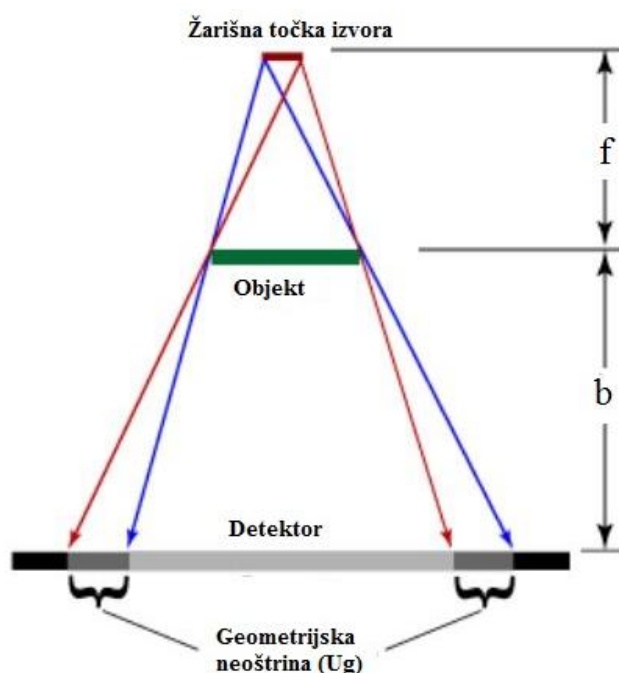
Uzevši u obzir prikazani graf odnosno krivulje za odabrane materijale te debljinu prozračivanja, odabrani su maksimalni naponi snimanja. Tablicom 3 prikazane su maksimalne vrijednosti napona prema grafu te odabrani parametri snimanja za svaki uzorak.

Tablica 3. Usporedba zahtjeva norme te odabranih napona snimanja

Uzorak	Maksimalni naponi snimanja prema normi ISO 17636-2	Odabrani naponi snimanja
	[kV]	[kV]
Al 3	48	50
Al 12	68	70
Fe 3	125	125
Fe 20	280	250

5.2.5. Udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka

Udaljenost izvora zračenja i objekta ispitivanja direktno je povezana s postignutom neoštrinom. Naime, veća udaljenost predstavlja povoljniji slučaj iz razloga što se zračenje koje dolazi na slikovnu ploču iz različitih područja žarišne točke ne „razilazi“, čime se umjesto mutnih obrisa dobivaju oštre prijelazne linije. Princip utjecaja udaljenosti izvora zračenja od objekta (f) i udaljenosti objekta od detektora (b) na ostvarenu neoštrinu prikazan je slikom 18.



Slika 18. Utjecaj udaljenosti izvora zračenja od objekta (f) i udaljenosti objekta od detektora (b) na ostvarenu neoštrinu [1]

Minimalna udaljenost izvora zračenja od ispitnog uzorka ovisi o veličini fokusa izvora zračenja te udaljenosti ispitnog uzorka od detektora, prema formuli definiranoj normom za klasu B radiografske tehnike, pri čemu su:

- f_{\min} – minimalna udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka,
- d – veličina fokusa izvora zračenja,
- b – udaljenost između ispitnog uzorka i detektora.

$$f_{\min} \geq 15db^{2/3} \quad (5)$$

U slučaju kada je udaljenost između ispitnog uzorka i detektora b manja od iznosa $1.2t$, pri čemu je t nominalna debljina uzorka, vrijednost b u navedenoj jednadžbi zamjenjuje se vrijednošću nominalne debljine uzorka t [5]. Kako su prilikom svih ispitivanja uzorci postavljeni izravno na slikovnu ploču, prilikom izračuna minimalne udaljenosti izvora zračenja od ispitnih uzoraka, u jednadžbi (5) za svaki uzorak veličina b zamijenjena je nominalnom debljinom uzorka t . Tablicom 4 prikazane su vrijednosti uvrštene u jednadžbu, izračunata minimalna udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka te udaljenost na kojoj je provedeno ispitivanje za sva 4 uzorka.

Tablica 4. Minimalna udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka

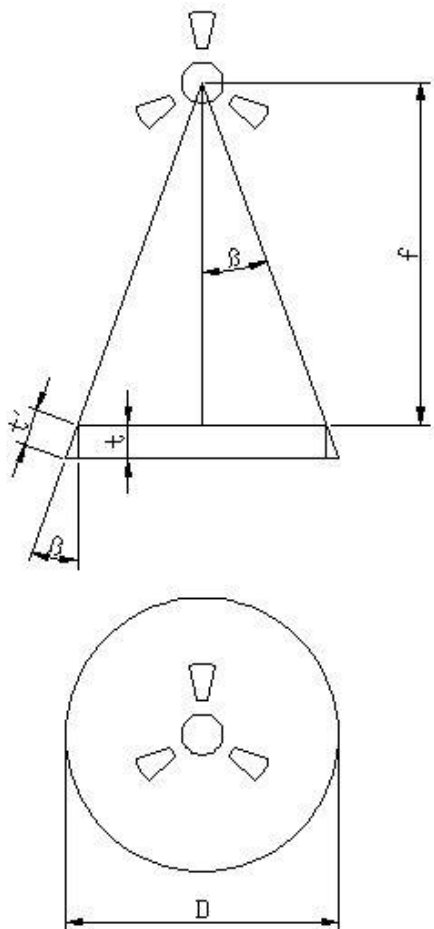
Uzorak	Veličina fokusa d [mm]	Udaljenost između ispitnog uzorka i detektora $b = t$ [mm]	Minimalna udaljenost izvora zračenja i ispitnog uzorka f_{\min} [mm]	Udaljenost na kojoj je provedeno ispitivanje f [mm]
Al 3	2	3	63	1000
Al 12	2	12	158	1000
Fe 3	2	3	63	1000
Fe 20	2	20	221	700

5.2.6. *Maksimalna površina jedne ekspozicije*

Prema zahtjevima norme [5], poglavlje 7.8 klase B radiografskih tehnika, omjer „prozračene“ debljine na vanjskim rubovima područja ispitivanja i debljine u centru zračenja ne smije biti veći od 1.1. Područje koje je potrebno ispitati uključuje zavar te zonu utjecaja topline. Također, potrebno je ispitati otprilike 10 mm osnovnog metala sa svake strane zavara [5]. S obzirom da je kut snimanja rendgenskih uređaja kojim su se provodila ispitivanja 20° te s obzirom na plan ispitivanja prikazan u poglavlju 5.2.2., omjer debljina nije prelazio navedeni maksimum od 1.1.

Slikom 19 prikazan je kut snimanja rendgenskog uređaja te princip izračuna maksimalne površine za jednu ekspoziciju pri čemu su:

- f – udaljenost izvora zračenja od ispitnog uzorka,
- t – debljina prozračivanja u centru zračenja (nominalna debljina uzorka),
- t' – debljina prozračivanja na rubovima zračenja,
- β – kut snimanja rendgenskog uređaja,
- D – maksimalan promjer ekspozicije.



Slika 19. Princip izračuna maksimalne površine jedne ekspozicije

Navedeni omjer debljina prozračivanja ovisi isključivo o kutu snimanja prema jednadžbi (6).

$$\frac{t'}{t} = \frac{1}{\cos(\beta)}, \quad \text{uz uvjet } \frac{t'}{t} < 1.1 \quad (6)$$

Uzevši u obzir kut snimanja uređaja od 20° dobiva se omjer debljina prozračivanja u iznosu od 1.064 što zadovoljava navedeni uvjet.

Daljnijim proračunom prema formuli (7) dobiven je promjer koji rendgenski uređaj pokriva svojim kutom snimanja ovisno o udaljenosti f . Tablicom 5 prikazane su dobivene vrijednosti promjera za snimane udaljenosti pojedinog uzorka.

$$D = 2f \times \operatorname{tg}(\beta) \quad (7)$$

Tablica 5. Maksimalan promjer površine ekspozicije u odnosu na udaljenosti izvora zračenja od ispitnog uzorka

Uzorak	Udaljenost izvora zračenja od ispitnog uzorka f [mm]	Maksimalan promjer ekspozicije D [mm]
Al 3	1000	728
Al 12	1000	728
Fe 3	1000	728
Fe 20	700	510

5.2.7. Usporedba snimanih parametara i zahtjeva norme

Tablicama 6 – 9 dane su postavke snimanja te zahtjevi norme za svaki od uzorka.

Tablica 6. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Al 3

Uzorak Al 3 mm		
Parametri snimanja	Norma	Snimano
Napon [kV]	< 48	50
Struja [mA]	/	4
Vrijeme ekspozicije [s]	/	40
f (udaljenost izvora i objekta) [mm]	> 63	1000
Postavljanje “duplex” indikatora	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°
Postavljanje jednostrukog žičanog indikatora	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar
Parametri skeniranja	Skenirano	
Napon na fotomultiplikatoru [V]	5,25	
Snaga lasera [W/m ²]	15	
Rezolucija skeniranja [μm]	50	

Tablica 7. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Al 12

Uzorak Al 12 mm		
Parametri snimanja	Norma	Snimano
Napon [kV]	< 68	70
Struja [mA]	/	4
Vrijeme ekspozicije [s]	/	55
f (udaljenost izvora i objekta) [mm]	> 158	1000
Postavljanje “duplex” indikatora	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°
Postavljanje jednostrukog žičanog indikatora	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar
Parametri skeniranja	Skenirano	
Napon na fotomultiplikatoru [V]	5,25	
Snaga lasera [W/m ²]	15	
Rezolucija skeniranja [μm]	50	

Tablica 8. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Fe 3

Uzorak Fe 3 mm		
Parametri snimanja	Norma	Snimano
Napon [kV]	< 125	125
Struja [mA]	/	4
Vrijeme ekspozicije [s]	/	110
f (udaljenost izvora i objekta) [mm]	> 63	1000
Postavljanje “duplex” indikatora	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°
Postavljanje jednostrukog žičanog indikatora	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar
Parametri skeniranja	Skenirano	
Napon na fotomultiplikatoru [V]	5,25	
Snaga lasera [W/m ²]	15	
Rezolucija skeniranja [μm]	50	

Tablica 9. Postavke snimanja i zahtjevi norme za uzorak Fe 20

Uzorak Fe 20 mm		
Parametri snimanja	Norma	Snimano
Napon [kV]	< 280	250
Struja [mA]	/	4
Vrijeme ekspozicije [s]	/	180
f (udaljenost izvora i objekta) [mm]	> 221	700
Postavljanje “duplex” indikatora	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°	Na objekt, zakrenuti za 2 – 5°
Postavljanje jednostrukog žičanog indikatora	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar	Okomito na zavar, 10 mm dužine žice na području osnovnog metala neposredno uz zavar
Parametri skeniranja	Skenirano	
Napon na fotomultiplikatoru [V]	5,25	
Snaga lasera [W/m ²]	15	
Rezolucija skeniranja [μm]	50	

5.3. Analiza slikovnih zapisa

Nakon provedenog snimanja uzoraka i skeniranja slikovnih ploča, provedena je analiza slikovnih zapisa prema zahtjevima i uputstvima norme ISO 17636 – 2. Prema zahtjevima navedene norme, poglavlje 7.9.4.1, parametri kvalitete slikovnih zapisa SNR, SR_b , SNR_n te osjetljivost jednostruke žice ocjenjeni su na lineariziranim datotekama. Za potrebe rada i usporedbu dobivenih vrijednosti parametra na lineariziranim i nelineariziranim slikovnim zapisima, također su provedena mjerenja na nelineariziranim datotekama.

Razliku lineariziranih i nelineariziranih slikovnih zapisa predstavljaju vrijednosti intenziteta piksela. Naime, na lineariziranom slikovnom zapisu, svaki piksel ima vrijednost intenziteta jednaku stvarnoj dozi zračenja koje je doprijelo na to područje tijekom ekspozicije. Kod nelineariziranih slikovnih zapisa, vrijednosti intenziteta piksela su softverski pojačane s ciljem manjeg vremena ekspozicije te prilagođavanja slikovnih zapisa za lakši pregled.

Analiza slikovnog zapisa, prema zahtjevu spomenute norme, poglavlje 7.10, provodi se u zamračenoj prostoriji s minimalnim zahtjevima zaslona monitora.

5.3.1. Minimalni zahtjevi zaslona za analizu slikovnih zapisa

Tablicom 10 dani su minimalni zahtjevi monitora za analizu slikovnih zapisa te karakteristike monitora na kojima su provedena ispitivanja lineariziranih i nelineariziranih datoteka [5, 6, 7].

Tablica 10. Karakteristike monitora za analizu slikovnih zapisa

Vrsta datoteka	Monitor	Osvjetljenje [cd/m ²]	Nijansi sive	Kontrast	Veličina piksela [mm]	Broj piksela
Linearizirano	HP Z23i	250	256	1:1000	0,265	3145728
Nelinearizirano	hp pavilion G6 notebook PC	200	256	1:300	0.259	1024000
Minimalni zahtjevi norme		≥ 250	≥ 256	$\geq 1:250$	< 0.3	≥ 1024000

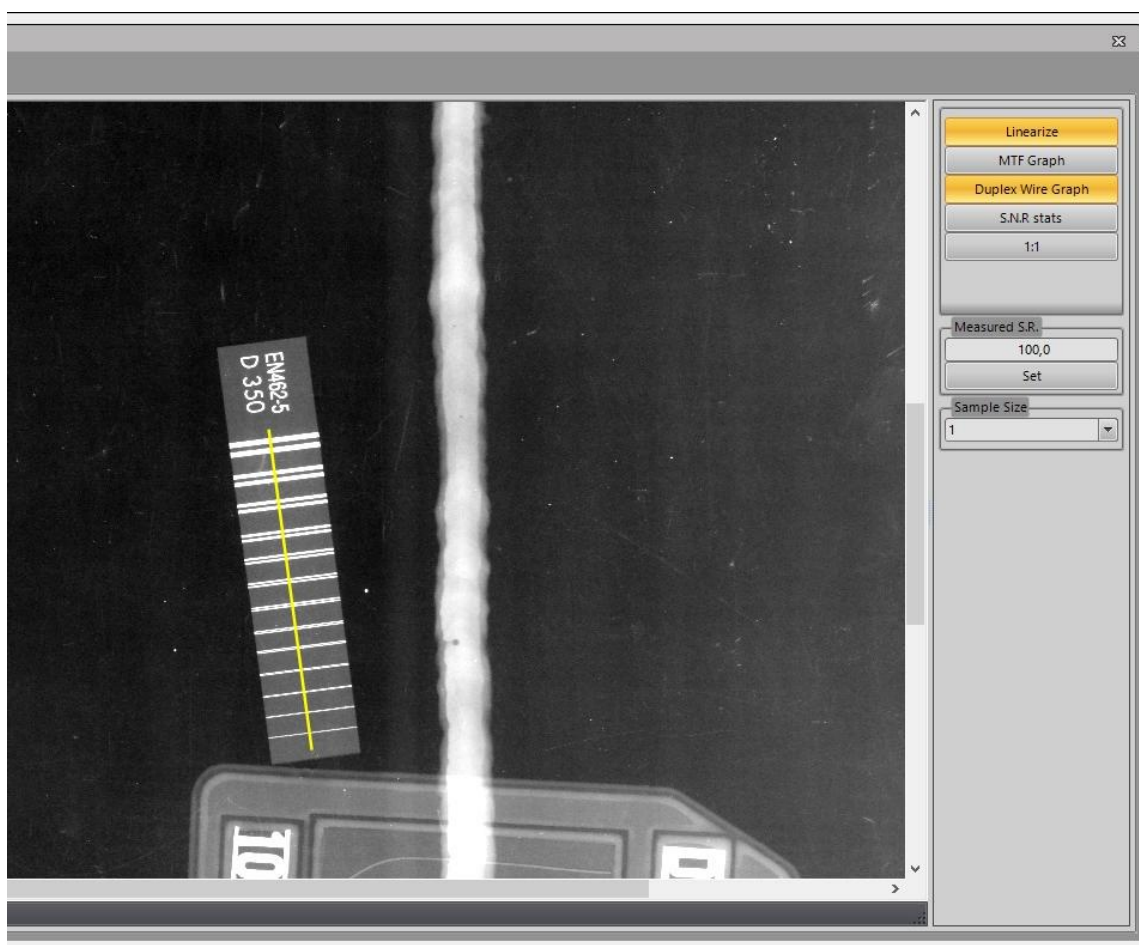
5.3.2. Postupak evaluacije parametara kvalitete

Kako bi se provela pravilna analiza parametara kvalitete slikovnih zapisa, postupci mjerenja u skladu su sa zahtjevima norme [5]. Za parametre SR_b , SNR_n te postignuta osjetljivost jednostruke žice izvršena su mjerenja na lineariziranim i nelineariziranim datotekama. Analiza parametra CNR odrađena je na nelineariziranim datotekama. Linearizirane vrijednosti izmjerene su pomoću softverskog paketa „Starrview 8“ koji omogućava analizu lineariziranih datoteka. Nelinearizirane vrijednosti izmjerene su softverskim paketom „ISee“. Za obje vrste analize, u narednim poglavljima prikazani su postupci mjerenja te u konačnici usporedba dobivenih vrijednosti.

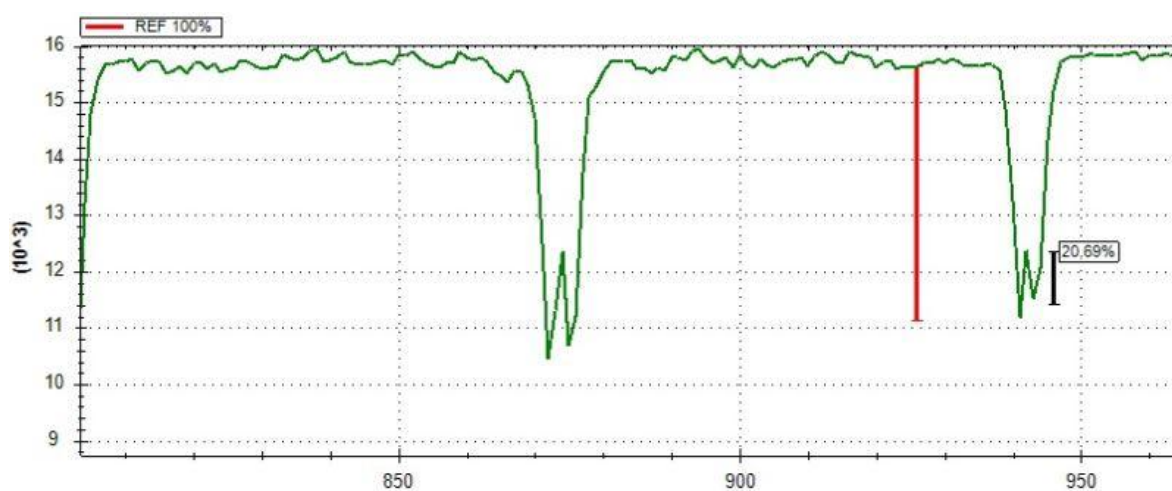
5.3.2.1. Određivanje prostorne rezolucije

S ciljem utvrđivanja postignute prostorne rezolucije, izmjerene su vrijednosti „sedla“ na „duplex“ indikatoru za svaki uzorak. Kao što je objašnjeno u poglavlju 3.1, posljednji par žica koji ne ispunjava zahtjev minimalno 20 % relativne vrijednosti intenziteta piksela „sedla“ u odnosu na „vrhove“ (međuprostor u odnosu na žicu) definira postignutu prostornu rezoluciju, odnosno vrijednost neoštine.

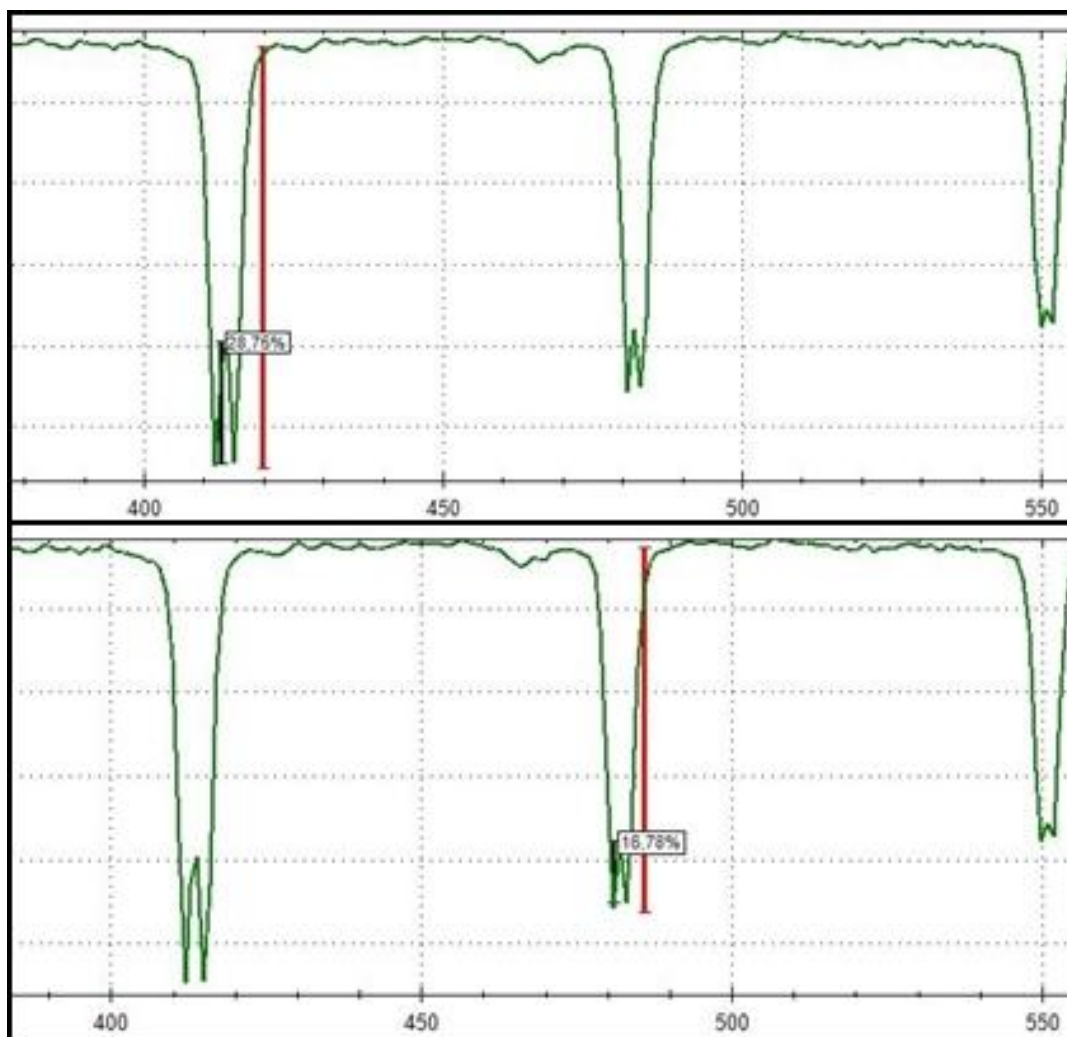
Linearizirane datoteke obrađene su u softverskom paketu „Starrview 8“ koji omogućava opcije linearizacije slikovnog zapisa te određivanja grafa „duplex“ indikatora. Navedeni odabir opcija prikazan je slikom 20. Nakon provedenih koraka, otvara se graf s vrijednostima sivih tonova ostvarenim na „duplex“ indikatoru. Sljedeći korak prikazan je slikom 21, a sastoji se od odabira referentne vrijednosti (podešene od strane operatera) na paru žica koji želimo izmjeriti (crvena oznaka) te mjerenja vrijednosti sedla (također podešene od strane operatera) za odabrani par žica (crna oznaka). Softver sam izračunava odnose intenziteta piksela kao postotak (također prikazanom slikom 21) što znatno olakšava postupak. Kako su vrijednosti posljednje žice koja zadovoljava, odnosno ne zadovoljava gotovo uvijek na samoj granici od 20 %, uz određenu prostornu rezoluciju, u narednom poglavlju, dane su vrijednosti sedla u postocima za posljednja dva para žica koji zadovoljava i ne zadovoljava. Kao primjer dana je slika 22 gdje su izmjerene vrijednosti sedla posljednja dva para žica za uzorak A1 3. Postupak je proveden na svim uzorcima.



Slika 20. Opcija linearizacije i aktivacije grafa "duplex" indikatora korištenjem softverskog paketa „Starrview“



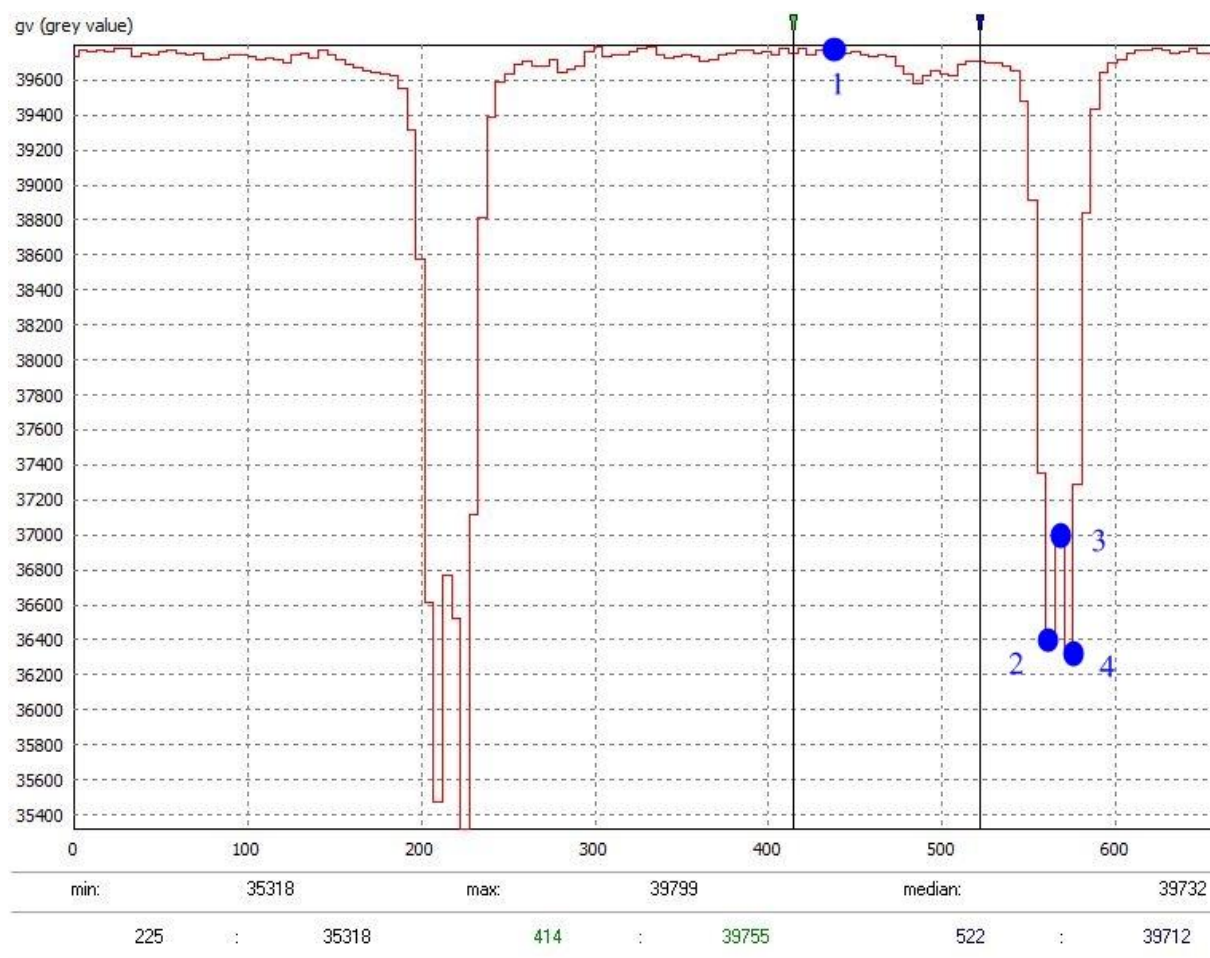
Slika 21. Analiza vrijednosti sivih tonova mjerenih na „duplex“ indikatoru softverskim paketom "Starrview"



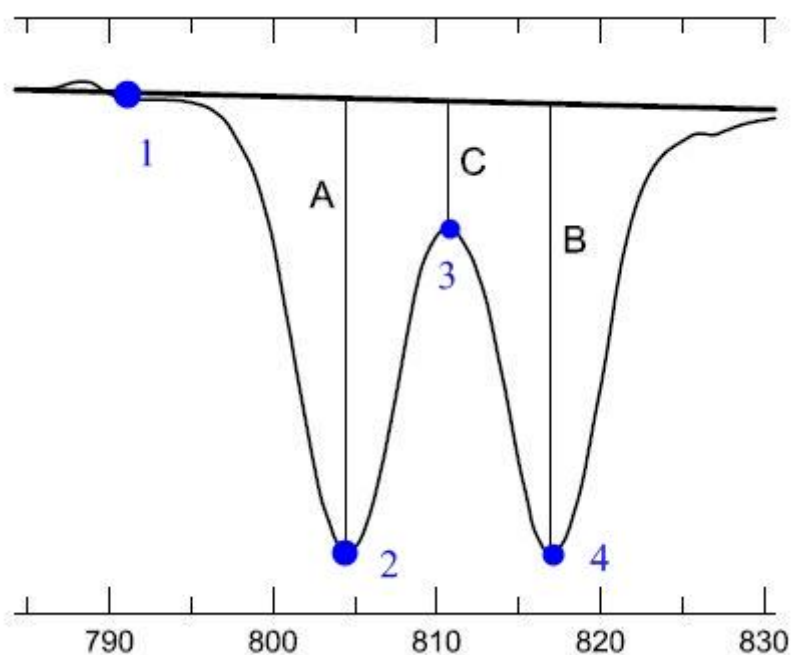
Slika 22. Prikaz analize para žice koji zadovoljava (gore) i koji ne zadovoljava (dolje) za uzorak AI 3

Nelinearizirane datoteke obrađene su u softverskom paketu „ISec“. Prikaz vrijednosti sivih tonova (graf) omogućuje opcija „profiler“ kao što je prikazano slikom 23. Plavi i zeleni pokazivači, također vidljivi na slici, služe za mjerenje ukupne vrijednosti sivih tonova na određenom području. Za razliku od „Starrview“ softverskog paketa, gdje su vrijednosti sedla odmah prikazane u postocima, u „ISec-u“ je taj postupak potrebno računati prema normi [5], poglavlje „Annex C“. Izračun postotka „sedla“ dan je formulom (8), dok je objašnjenje parametara formule dano slikom 24.

$$\text{dip (sedlo)} = \frac{A + B - 2C}{A + B} \times 100 [\%] \quad (8)$$



Slika 23. Prikaz opcije "profiler" te način mjerenje sedla softverskim paketom „ISee“



Slika 24. Definicija parametara za izračun postotka sedla formulom (8) [5]

Navedenim pokazivačima očitava se ukupna vrijednost sivih tonova u točkama 1 – 4 (točke su prikazane na slikama 23 i 24), a oduzimanjem vrijednosti navedenih sivih tonova očitanih u točki 1, s vrijednostima u točkama 2 – 4, dobivaju se vrijednosti parametara iz formule (A, B i C).

5.3.2.2. *Određivanje normaliziranog odnosa signal/šum*

Kako bi se utvrdila vrijednost parametra SNR, prema formuli (1) potrebno je odrediti srednju vrijednost intenziteta piksela te njegovu standardnu devijaciju odnosno šum. Mjerenje je provedeno prema zahtjevima norme [5], poglavlje „Annex D“, koja definira minimalan broj piksela jednog područja od interesa (eng. „ROI“ - region of interest) koji iznosi 1100 (20*55) piksela. Također, sva mjerenja provedena su u području jednolikog intenziteta piksela koje se nalazi na osnovnom metalu uz zavareni spoj. Na svakom uzorku izvršeno je 5 mjerenja područja od interesa te se uzimala njihova aritmetička sredina kao konačan rezultat. Oba rezultata SNR-a (linearizirane i nelinearizirane datoteke) normalizirana su prema formuli (2) izmjerenom prostornom rezolucijom.

Analiza lineariziranih datoteka odrađena je uz pomoć „Starrview“ softverskog paketa koji omogućava željeni broj mjerenja te prikaz tablice potrebnih vrijednosti kao i direktan izračun parametra SNR. Slikom 25 prikazano je odabrano područje mjerenja, dok je na slici 26 kao primjer dana tablica vrijednosti za uzorak Al 12. Svih 5 mjerenja izvršeno je u području jednolikog intenziteta piksela koje se nalazi na osnovnom metalu neposredno uz zavareni spoj. „Spatial resolution“ koji je vidljiv u tablici 26 za svako mjerenje (fiksne vrijednosti 100) ne odnosi se na izmjerenu postignutu rezoluciju već je unaprijed definiran softverom.



Slika 25. Način mjerenja i područje od interesa za određivanje vrijednosti SNR-a softverskim paketom „Starrview“

Image Graph Statistics						
Clear						
	Mean	psl	psl corr	Spatial Resolution	psl_100	S.N.R.
1	17487	90	91,6110	100,0000	103,3984	169,1225
2	17499	81	82,4499	100,0000	93,0586	188,0428
3	17303	87	88,5573	100,0000	99,9518	173,1134
4	17621	106	107,8974	100,0000	121,7804	144,6949
5	17553	86	87,5394	100,0000	98,8029	177,6567

Slika 26. Tablica vrijednosti SNR-a za odabrana područja od interesa izmjerena softverom „Starrview“

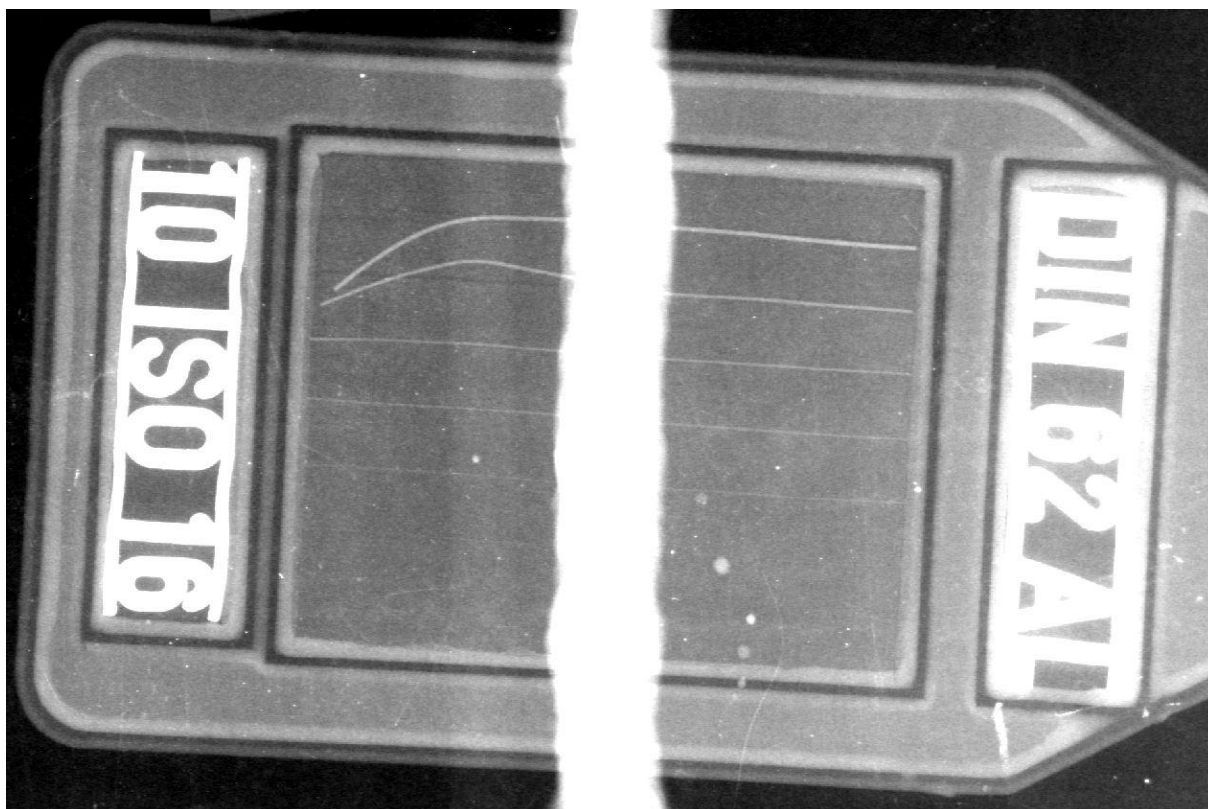
Nelinearizirane datoteke obrađene su u „ISee“ softverskom paketu gdje pomoću opcije „Local image statistics“ definiramo veličinu područja od interesa te očitavamo srednje vrijednosti intenziteta piksela te njihovu standardnu devijaciju. Slikom 27 dan je primjer određivanja parametra SNR u programu „ISee“.



Slika 27. Određivanje parametra SNR u programu „ISee“

5.3.2.3. Određivanje radiografske osjetljivosti

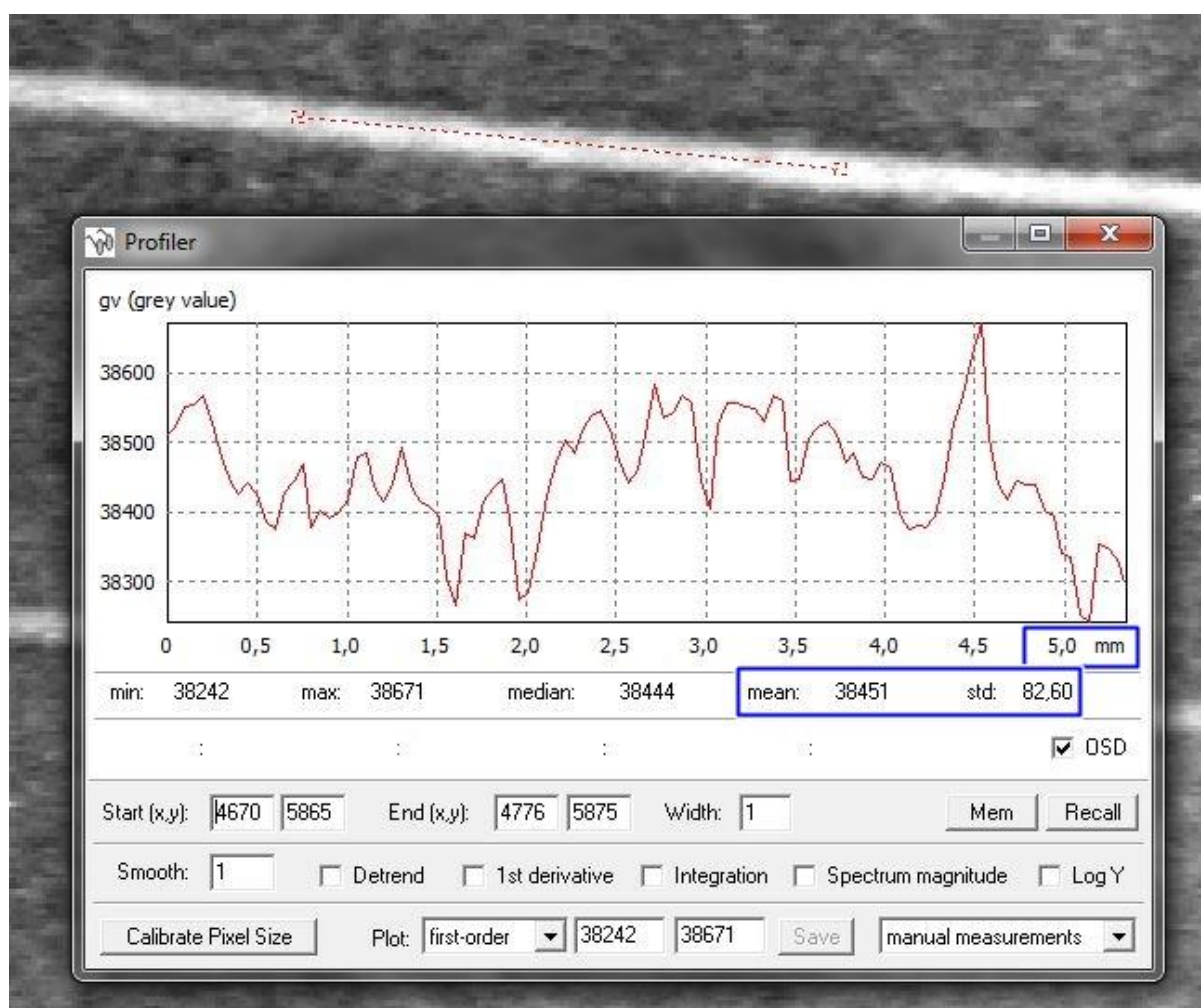
Određivanje postignute radiografske osjetljivosti provedeno je na jednak način, iako u dva različita softvera, za linearizirane i nelinearizirane datoteke. Prilikom očitavanja posljednje žice podešen je kontrast kako bi očitavanje bilo što preciznije. Slikom 28 dan je primjer analize jednostrukog žičanog indikatora u softverskom paketu „Starrview“.



Slika 28. Analiza jednostrukog žičanog indikatora podešavanjem kontrasta

5.3.2.4. Određivanje odnosa kontrast/šum

Parametar CNR određen je na nelineariziranim datotekama u programu „ISee“. Za svaki uzorak, kao vrijednost intenziteta piksela signala i okolnog područja (pozadine) uzete su vrijednosti sa jednostrukog žičanog indikatora. Sva mjerenja provedena su na W10 žici (prema normi EN 462, žica W10 promjera 0.4 mm). Izvršena su 3 mjerenja intenziteta piksela na žici, 3 mjerenja intenziteta piksela na okolnom području uz žicu te njihove standardne devijacije. Za svaki skup određena je aritmetička sredina, ukupna prosječna standardna devijacija te izračunat parametar CNR prema formuli (3). Referentna veličina uzorka je 100 ± 10 piksela. Slikom 29 prikazan je princip mjerenja s ciljem određivanja parametra CNR.



Slika 29. Princip mjerenja s ciljem određivanja parametra CNR

5.3.3. Prikaz rezultata

Analiza slikovnih zapisa odrađena je prema postupcima prikazanim u prethodnom poglavlju. Rezultati su prikazani tablično te grafikonima radi lakše preglednosti i usporedbe dobivenih vrijednosti sa zahtjevima norme.

Za vrijednosti prostorne rezolucije dane su tablice sa postotkom sedla za dva para žica, za obje vrste slikovnih zapisa (linearizirane i nelinearizirane datoteke). Također, dan je grafikon usporedbe lineariziranih i nelineariziranih vrijednosti te minimalnih zahtjeva norme.

Parametar SNR i SNR_n također je prikazan tablično i grafikonom pri čemu su u tablicama dane srednje vrijednosti intenziteta piksela i standardne devijacije za sva mjerenja.

Postignuta radiografska osjetljivost također se prikazuje tablično gdje su dane izmjerene vrijednosti žice, debljina određene žice te osjetljivost izražena u postotku.

Za CNR parametar dane su vrijednosti intenziteta piksela te standardne devijacije za „osnovni“ i „pozadinski“ signal. Također, grafikonom su uspoređene vrijednosti dobivene na svakom ispitnom uzorku.

5.3.3.1. SR_b – prikaz rezultata

Minimalni zahtjevi norme za prostornu rezoluciju za klasu B radiografskih ispitivanja prikazani su tablicom 11. Tablicama 12 – 15 prikazani su izmjereni podaci te je slikom 30 dan stupčasti grafikon usporedbe rezultata dobivenih na lineariziranim (plavi stupac) i nelineariziranim (crveni stupac) datotekama sa minimalnim zahtjevima norme (zeleni stupac).

Tablica 11. Minimalni zahtjevi norme za prostornu rezoluciju za klasu B radiografskih ispitivanja [5]

Kvaliteta Slikovnog Zapisa Klasa B: "Duplex" žica ISO 19232-5		
Debljina prozracivanja w mm	Minimalna vrijednost indikatora kvalitete slike i maksimalna neoštrina mm	Maksimalna prostorna rezolucija (ekvivalentna debljini žice i razmaku) SR_b (image) mm
$w \leq 1,5$	D 13+ 0,08	0,04
$1,5 < w \leq 4$	D 13 0,10	0,05
$4 < w \leq 8$	D 12 0,125	0,063
$8 < w \leq 12$	D 11 0,16	0,08
$12 < w \leq 40$	D 10 0,20	0,10
$40 < w \leq 120$	D 9 0,26	0,13
$120 < w \leq 200$	D 8 0,32	0,16
$w > 200$	D 7 0,40	0,20

Tablica 12. Rezultati parametra SR_b za uzorak Al 3

Uzorak Al 3 mm						
Vrsta datoteke	Posljednji par žica koji zadovoljava		Prvi par žica koji ne zadovoljava		Postignuta prostorna rezolucija (SR_b) i neoština (u)	Minimalni zahtjevi prema normi ISO 17636-2
	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]		
Linearizirano	D11	28,75	D12	17,2	D12	D13 $u \leq 0,10$ $SR_b \leq 0,05$
					$u = 0,125$	
					$SR_b = 0,063$	
Nelinearizirano	D11	33,1	D12	9,1	D12	
					$u = 0,125$	
					$SR_b = 0,063$	

Tablica 13. Rezultati parametra SR_b za uzorak Al 12

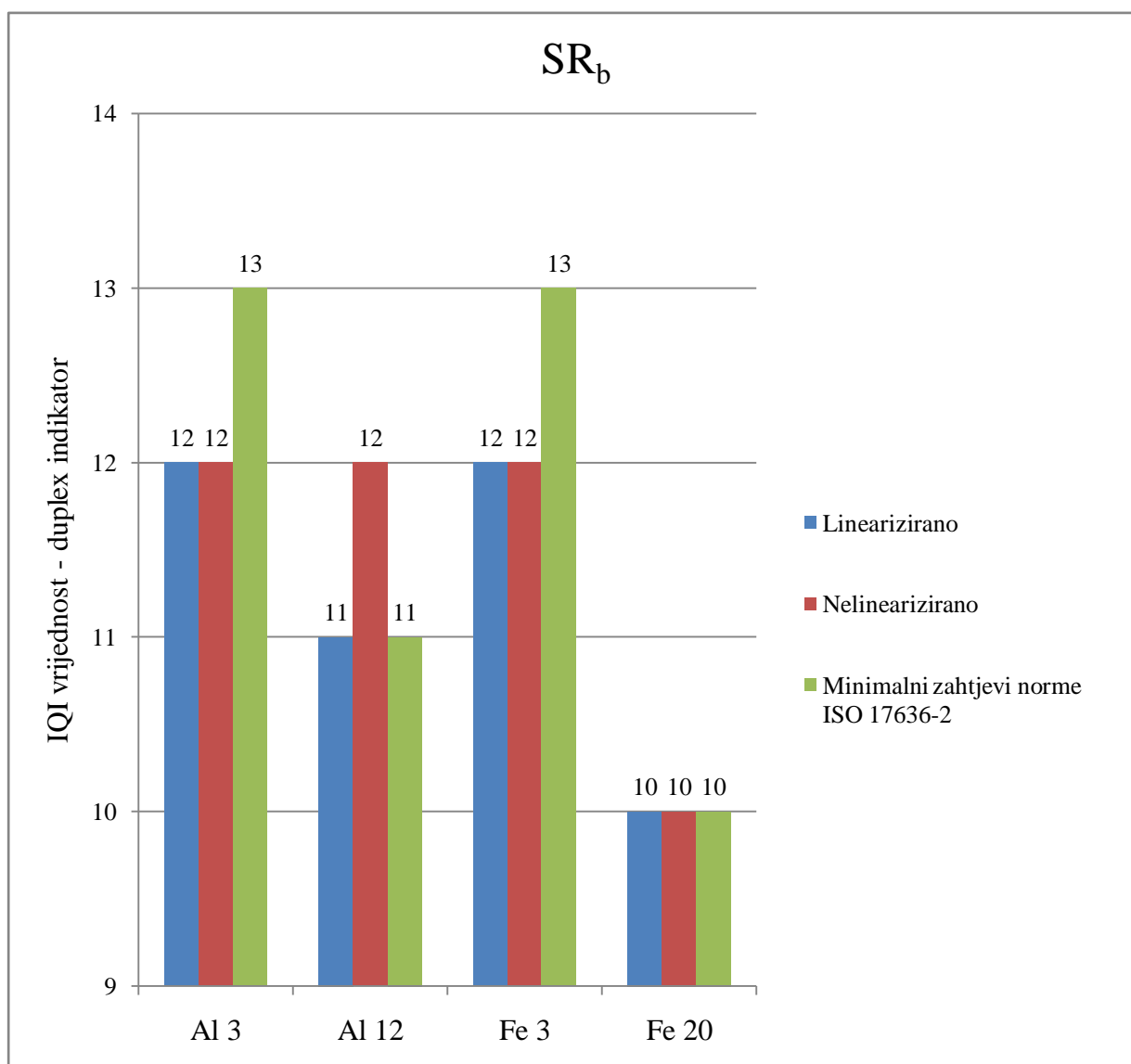
Uzorak Al 12 mm						
Vrsta datoteke	Posljednji par žica koji zadovoljava		Prvi par žica koji ne zadovoljava		Postignuta prostorna rezolucija (SR_b) i neoština (u)	Minimalni zahtjevi prema normi ISO 17636-2
	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]		
Linearizirano	D10	31,76	D11	16,64	D11	D11 $u \leq 0,16$ $SR_b \leq 0,08$
					$u = 0,16$	
					$SR_b = 0,08$	
Nelinearizirano	D11	28,4	D12	10,2	D12	
					$u = 0,125$	
					$SR_b = 0,063$	

Tablica 14. Rezultati parametra SR_b za uzorak Fe 3

Uzorak Fe 3 mm						
Vrsta datoteke	Posljednji par žica koji zadovoljava		Prvi par žica koji ne zadovoljava		Postignuta prostorna rezolucija (SR_b) i neoštrina (u)	Minimalni zahtjevi prema normi ISO 17636-2 u [mm] SR_b [mm]
	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]		
Linearizirano	D11	24,07	D12	4,5	D12	D13 $u \leq 0,10$ $SR_b \leq 0,05$
					u = 0,125	
					$SR_b = 0,063$	
Nelinearizirano	D11	26,8	D12	8,1	D12	
					u = 0,125	
					$SR_b = 0,063$	

Tablica 15. Rezultati parametra SR_b za uzorak Fe 20

Uzorak Fe 20 mm						
Vrsta datoteke	Posljednji par žica koji zadovoljava		Prvi par žica koji ne zadovoljava		Postignuta prostorna rezolucija (SR_b) i neoštrina (u)	Minimalni zahtjevi prema normi ISO 17636-2 u [mm] SR_b [mm]
	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]	Oznaka prema EN 462	Vrijednost "sedla" [%]		
Linearizirano	D9	33,33	D10	13,79	D10	D10 $u \leq 0,20$ $SR_b \leq 0,1$
					u = 0,2	
					$SR_b = 0,1$	
Nelinearizirano	D9	37	D10	18,5	D10	
					u = 0,2	
					$SR_b = 0,1$	



Slika 30. Grafikon usporedbe rezultata postignute prostorne rezolucije - SR_b

5.3.3.2. SNR – prikaz rezultata

Minimalni zahtjevi norme za normalizirani odnos signal/šum za klasu B radiografskih ispitivanja prikazani su tablicom 16 za čelik te tablicom 17 za aluminij. Tablicama 18 i 19 prikazani su izmjereni podaci te je slikom 31, jednako kao i u prethodnom poglavlju, dan stupčasti grafikon usporedbe rezultata dobivenih na lineariziranim (plavi stupac) i nelineariziranim (crveni stupac) datotekama sa minimalnim zahtjevima norme (zeleni stupac).

Tablica 16. Minimalni zahtjevi norme za normalizirani odnos signal/šum za klasu B radiografskih ispitivanja za čelik [5]

Izvor zračenja	Debljina prozračivanja w [mm]	Minimalna vrijednost SNR _n	
		Klasa A	Klasa B
Naponi X - zračenja ≤ 50 kV		100	150
Naponi X - zračenja > 50 kV - 150 kV		70	120
Naponi X - zračenja > 150 kV - 250 kV		70	100
Naponi X - zračenja > 250 kV - 350 kV	≤ 50	70	100
	> 50	70	70

Tablica 17. Minimalni zahtjevi norme za normalizirani odnos signal/šum za klasu B radiografskih ispitivanja za aluminij [5]

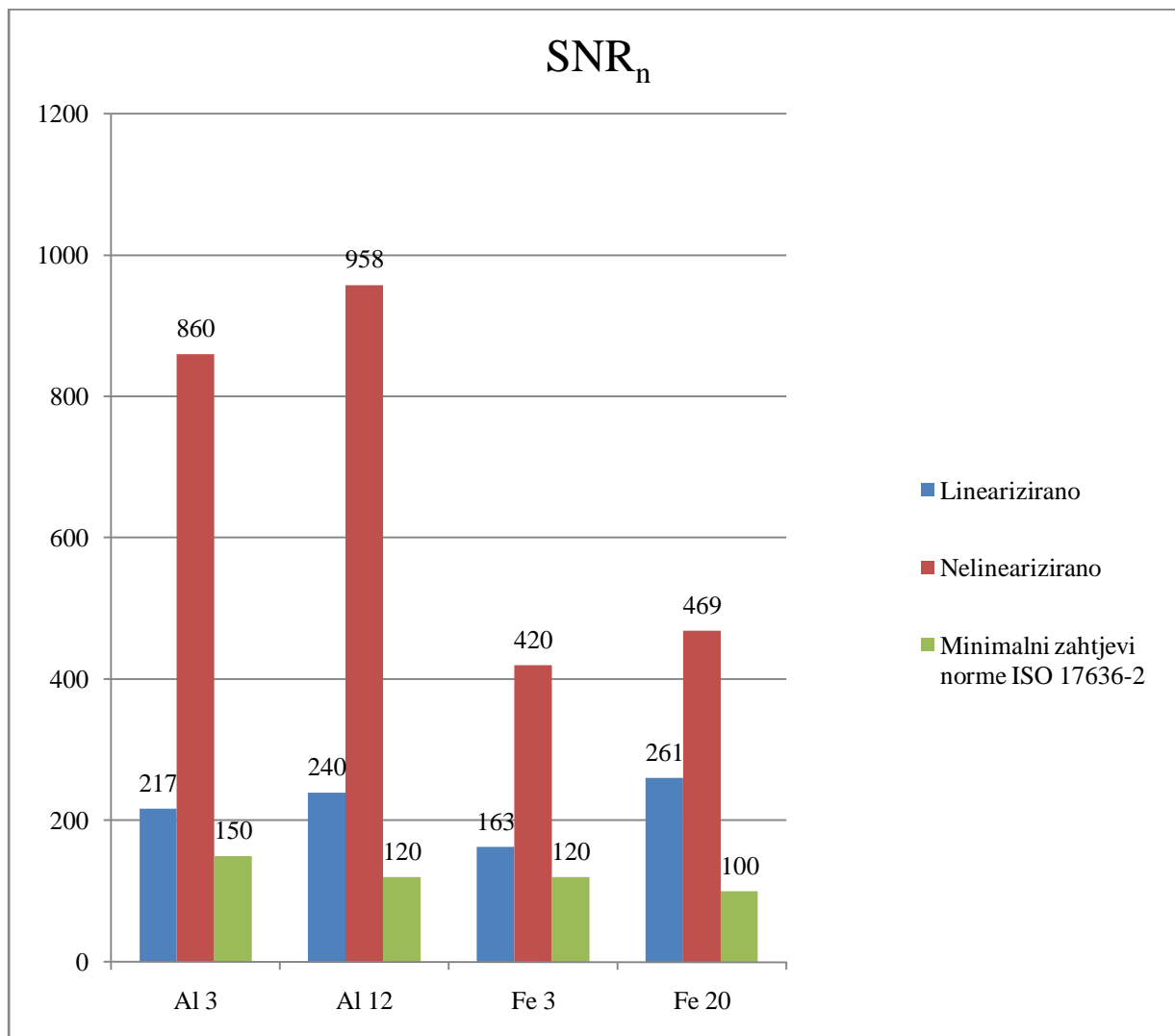
Izvor zračenja	Minimalna vrijednost SNR _n	
	Klasa A	Klasa B
Naponi X - zračenja ≤ 150 kV	70	120
Naponi X - zračenja > 150 kV - 250 kV	70	100
Naponi X - zračenja > 250 kV - 500 kV	70	100
Yb 169	70	100
Se 75	70	100

Tablica 18. Rezultati normaliziranog odnosa signal/šum izmjeren na lineariziranim datotekama

Linearizirani slikovni zapisi						
Uzorak	Broj mjerjenja	Srednja vrijednost intenziteta piksela (mean) I_{signala}	Standardna devijacija intenziteta piksela - šum	SNR		SNR_n
Al 3	1	17417	118,3	147	154	217
	2	17276	118,3	146		
	3	17303	110,3	157		
	4	17407	113,7	153		
	5	17515	103,4	169		
Al 12	1	17487	103,4	169	171	240
	2	17499	93	188		
	3	17303	100	173		
	4	17621	121,8	145		
	5	17553	98,8	178		
Fe 3	1	5082	44,8	113	116	163
	2	5113	45,9	111		
	3	5059	44,8	113		
	4	5054	41,4	122		
	5	5068	42,5	119		
Fe 20	1	8080	34,5	234	235	261
	2	8097	34,4	235		
	3	8030	35,6	226		
	4	7939	32,2	247		
	5	8106	34,5	235		

Tablica 19. Rezultati normaliziranog odnosa signal/šum izmjeren na nelineariziranim datotekama

Nelinearizirani slikovni zapisi					
Uzorak	Broj mjerjenja	Srednja vrijednost intenziteta piksela (mean) I_{signala}	Standardna devijacija intenziteta piksela - šum	SNR	
Al 3	1	40731	66,7	611	860
	2	40739	64,5	632	
	3	40821	70,9	576	
	4	40734	71,7	568	
	5	40671	60,7	670	
Al 12	1	40130	52,7	761	958
	2	40009	63,1	634	
	3	40243	57,5	700	
	4	40178	61,2	657	
	5	39989	61,2	653	
Fe 3	1	25954	84,9	306	420
	2	25986	89,6	290	
	3	25905	90,28	287	
	4	25866	87,9	294	
	5	25960	81,8	317	
Fe 20	1	31106	62,1	501	469
	2	31124	55,7	559	
	3	30960	56,8	545	
	4	30750	58,7	524	
	5	30962	59,5	520	



Slika 31. Grafikon usporedbe rezultata normaliziranog odnosa signal/šum - SNR_n

5.3.3.3. Radiografska osjetljivost – prikaz rezultata

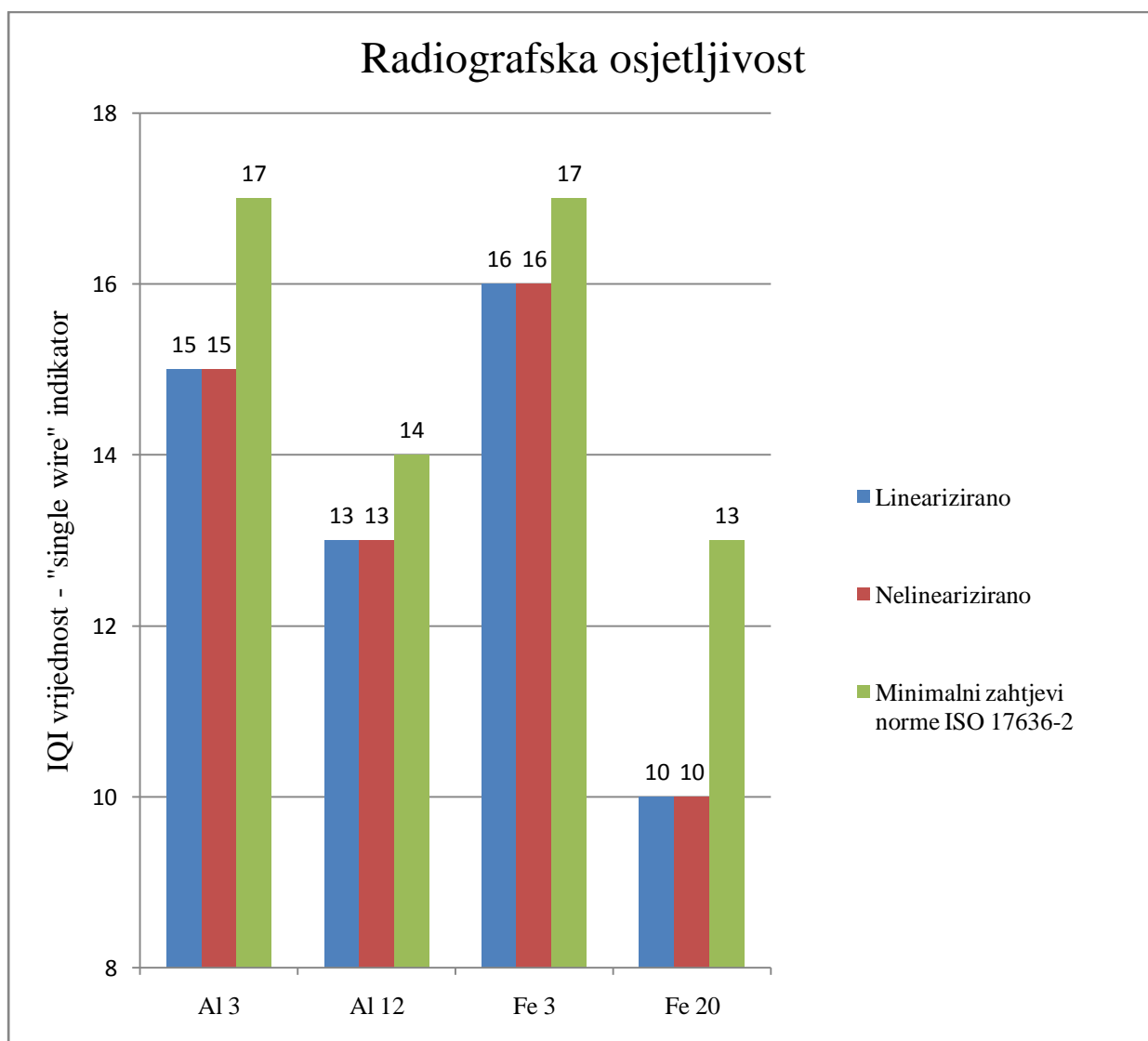
Tablicom 20 prikazani su minimalni zahtjevi radiografske osjetljivosti s obzirom na nominalnu debljinu uzorka. Tablicom 21 prikazana je postignuta osjetljivost u obliku oznake indikatora (žice), naveden je njen promjer te je ostvarena osjetljivost prikazana u postocima (izračunata prema formuli (4)). S obzirom da su provedena mjerenja dala jednake rezultate za linearizirane i nelinearizirane datoteke, tablicom 21 dane su vrijednosti obje vrste rezultata. Također, grafikonom na slici 32 prikazane su dobivene vrijednosti za linearizirane i nelinearizirane datoteke te minimalni zahtjevi norme.

Tablica 20. Minimalni zahtjevi vrijednosti jednostrukog žičanog indikatora s obzirom na nominalnu debljinu uzorka [5]

Kvaliteta Slikovnog Zapisa-Klasa B: jednostruka žica				
Nominalna debljina t mm				IQI vrijednost
		do	1,5	W 19
iznad	1,5	do	2,5	W 18
iznad	2,5	do	4	W 17
iznad	4	do	6	W 16
iznad	6	do	8	W 15
iznad	8	do	12	W 14
iznad	12	do	20	W 13
iznad	20	do	30	W 12
iznad	30	do	35	W 11
iznad	35	do	45	W 10
iznad	45	do	65	W 9
iznad	65	do	120	W 8
iznad	120	do	200	W 7
iznad	200	do	350	W 6
iznad	350			W 5

Tablica 21. Rezultati postignute radiografske osjetljivosti

Uzorak	Izmjerena vrijednost jednostrukog žičanog indikatora		Minimalni zahtjevi norme	Postignuta osjetljivost [%]
	Oznaka prema EN 462	Promjer žice [mm]	Oznaka prema EN 462	
Al 3 mm	W15	0,125	W17	4,2
Al 12 mm	W13	0,2	W14	1,7
Fe 3 mm	W16	0,1	W17	3,3
Fe 20 mm	W10	0,4	W13	2,0



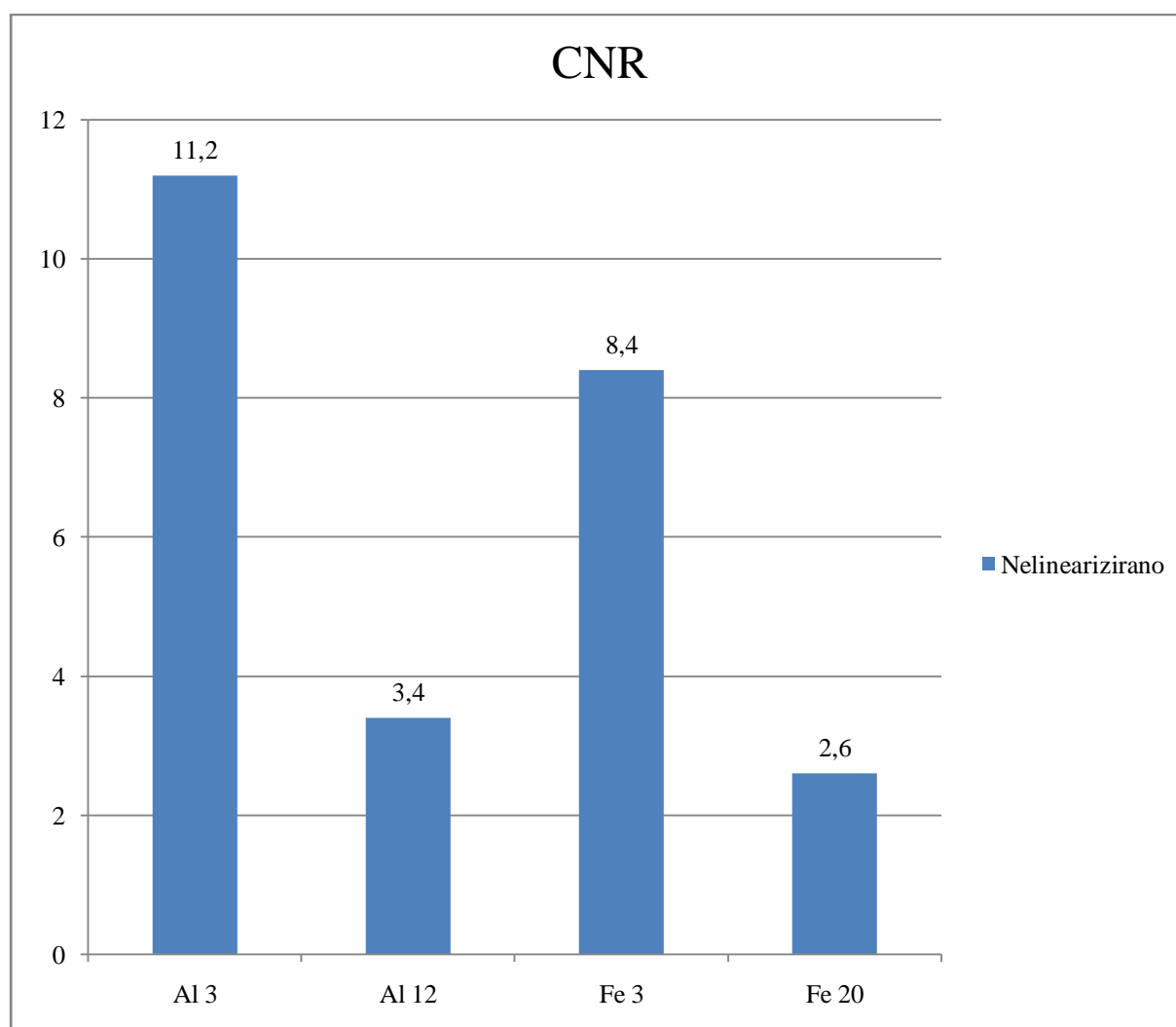
Slika 32. Grafikon usporedbe rezultata postignute radiografske osjetljivosti

5.3.3.4. CNR – prikaz rezultata

Mjerenje odnosa kontrast/šum provedeno je na nelineariziranim datotekama. Tablicom 22 dane su izmjerene vrijednosti „osnovnog“ i „pozadinskog“ intenziteta piksela te je izračunat parametar CNR za svaki uzorak. Grafikonom na slici 33 prikazana je usporedba dobivenih rezultata za svaki uzorak.

Tablica 22. Rezultati mjerenja odnosa kontrast/šum - CNR

Uzorak	Područje mjerenja	Broj mjerenja	Srednja vrijednost intenziteta piksela (mean)		Standardna devijacija intenziteta piksela - šum		CNR
Al 3	Žica	1	38496	38485	74,4	67,0	11,2
		2	38582		58,3		
		3	38377		77,32		
	Pozadina	1	39244	39237	58,1		
		2	39303		53,1		
		3	39164		80,5		
Al 12	Žica	1	39316	39286	57,8	58,2	3,4
		2	39296		60,4		
		3	39247		68,1		
	Pozadina	1	39473	39484	56,2		
		2	39482		58,1		
		3	39498		48,8		
Fe 3	Žica	1	24637	24660	108,8	96,6	8,4
		2	24647		108		
		3	24696		91,4		
	Pozadina	1	25503	25469	95,9		
		2	25523		66,3		
		3	25382		109,1		
Fe 20	Žica	1	30776	30807	157,6	118,3	2,6
		2	30792		125,4		
		3	30854		112,6		
	Pozadina	1	31160	31120	142		
		2	31042		110		
		3	31158		62,05		



Slika 33. Grafikon usporedbe rezultata odnosa kontrast/šum

5.3.4. Osvrt na rezultate ispitivanja

Provedenim eksperimentom željela se utvrditi mogućnost ostvarivanja minimalno zahtijevane kvalitete slikovnih zapisa s obzirom na odabir parametara snimanja i analize slikovnih zapisa prema referentnoj normi. U tu svrhu, odabrane su granične vrijednosti energije zračenja (maksimalan napon snimanja) kako bi se dobio uvid u kvalitetu slikovnih zapisa pri najnepovoljnijim vrijednostima energije zračenje. Ostali parametri snimanja također su odabrani prema zahtjevima norme [5]. S ciljem utvrđivanja ostvarene kvalitete slikovnih zapisa provedena je analiza istih te su izmjereni parametri kvalitete SR_b , SNR_n , CNR te ostvarena radiografska osjetljivost izmjerena pomoću jednostrukog žičanog indikatora.

Postignuta prostorna rezolucija te ujedno i postignuta neoštrina, određeni su pomoću „duplex“ indikatora. Navedeni parametri evaluirani na uzorcima veće debljine (Al 12 i Fe 20), na graničnim su vrijednostima zahtjeva norme te, prema navedenom, zadovoljavaju minimalne kriterije. Uzorci manje debljine (Al 3 i Fe 3) ne zadovoljavaju minimalne kriterije norme iz razloga većih vrijednosti neoštrine i postignute prostorne rezolucije od maksimalno dopuštene za promatrani raspon debljina. Izmjerene vrijednosti postignute rezolucije na lineariziranim i nelineariziranim datotekama ne razlikuju se značajno.

Normalizirani odnos signal/šum dobiven mjerenjem na lineariziranim i nelineariziranim datotekama zadovoljava minimalne zahtjeve norme u oba slučaja. Međutim, vrijednosti dobivene na nelineariziranim datotekama značajno su veće u odnosu na one dobivene na lineariziranim slikovnim zapisima. Iako su, kao što je navedeno, u oba slučaja zahtjevi norme ispunjeni, dobiveni rezultati na lineariziranim datotekama znatno su bliže minimalnim zahtijevanim od vrijednosti dobivenih na nelineariziranim datotekama. Kako norma zahtjeva analizu parametra na lineariziranim datotekama, navedeno može predstavljati problem te se može ostvariti lažna percepcija ispunjenja zahtjeva norme. Također, zadovoljavajući rezultati mogu se uzeti u svezu sa odabranim višim vrijednostima napona pri čemu se ostvaruju više vrijednosti odnosa signal/šum.

Radiografska osjetljivost izmjerena pomoću jednostrukog žičanog indikatora ne zadovoljava zahtjeve norme na sva 4 uzorka. Valja napomenuti kako su rezultati mjerenja na uzorku Fe 20, koji je najveće debljine, najlošiji s obzirom na zahtjeve norme (broj vidljive žice), međutim osjetljivost izražena u postocima bolja je od uzoraka Al 3 i Fe 3. Kako veća nominalna debljina u konačnici smanjuje postotak, osjetljivost izražena u postocima tako predstavlja „orijentacijsku“ vrijednost, dok je stvarnu evaluaciju radiografske osjetljivosti

potrebno provesti s obzirom na vrijednosti jednostrukog žičanog indikatora. S obzirom da prema analizi slikovnih zapisa svih uzoraka evaluirani parametar ne zadovoljava traženu osjetljivost, isti se ocjenjuje kao nezadovoljavajući. Važno je spomenuti kako promatrana norma, ISO 17636 – 2, sugerira upotrebu olovnih folija prilikom snimanja koje u ovom radu nisu korištene. Cilj navedenih folija je smanjenje (filtriranje) raspršenog zračenja koje doprinosi većem šumu i neoštrini te pojačavanje intenziteta primarnog zračenja.

Izmjerene vrijednosti parametra odnos kontrast/šum daju usporedbu ostvarenog kontrasta svih uzoraka. Iz prikazanih rezultata lako je ocijeniti da su dobivene vrijednosti većeg kontrasta kod uzoraka manje debljine (Al 3 i Fe 3). Navedeno je u skladu sa dobivenim rezultatima radiografske osjetljivosti dobivene pomoću jednostrukog žičanog indikatora, gdje su najlošije vrijednosti izmjerene upravo na uzorku najveće debljine (Fe 20). Također, valja napomenuti da stvarno ostvareni parametar CNR, na svakom od slikovnih zapisa, predstavlja kontrast posljednje vidljive žice te okolnog područja, međutim iz razloga nemogućnosti mjerenja toliko malog područja, u obzir su uzete vrijednosti žice jednakog promjera na svim slikovnim zapisima (već navedena W10 žica).

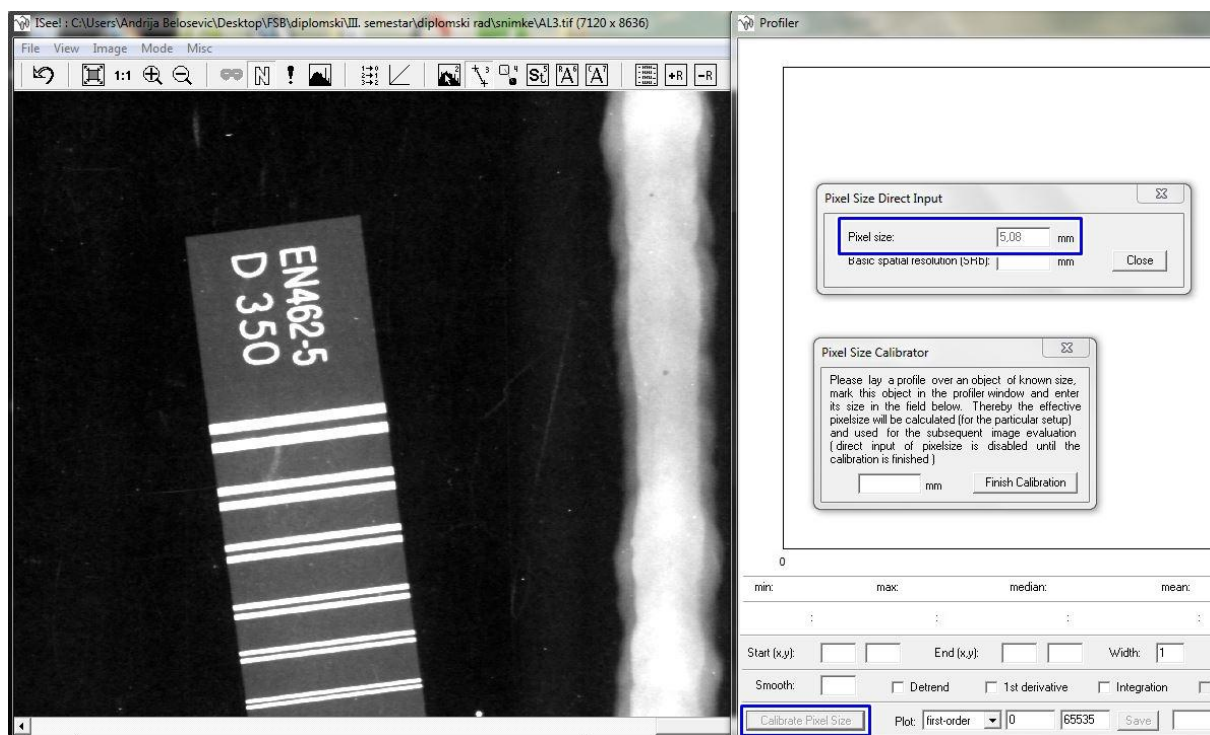
Iako zahtjevi monitora za analizu nelineariziranih slikovnih zapisa nisu u potpunosti ostvareni, što se prvenstveno odnosi na maksimalnu svjetlinu zaslona (vidljivo u tablici 10), valja napomenuti kako se izmjerene radiografske osjetljivosti na lineariziranim i nelineariziranim datotekama ne razlikuju, iako monitor na kojem se analizirala osjetljivost lineariziranih datoteka zadovoljava sve potrebne kriterije.

5.4. Razine prihvatljivosti za zavarene spojeve

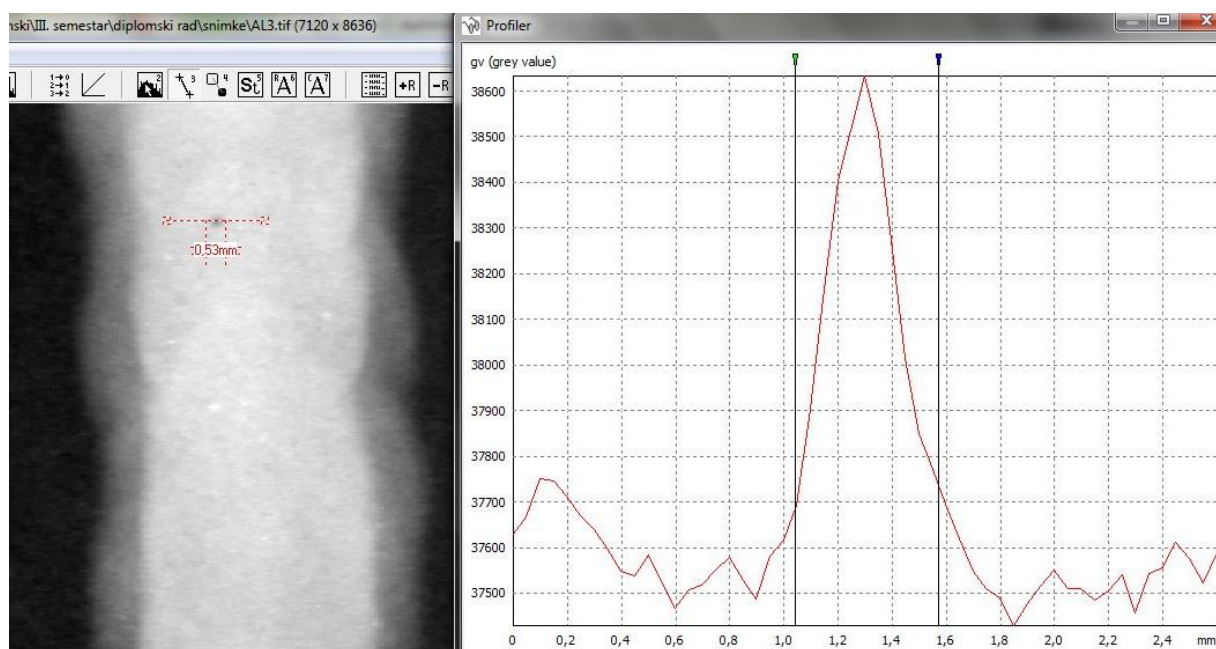
Iako nakon provedenih ispitivanja i analize slikovnih zapisa nisu zadovoljeni svi zahtjevi norme, u radu je bilo potrebno ocijeniti mogu li se unatoč navedenome detektirati nepravilnosti koje definiraju određenu razinu prihvatljivosti zavarenog spoja što bi u konačnici predstavljalo mogućnost ocjene zavarenog spoja. U tu svrhu odabrana je najstroža razina prihvatljivosti (razina prihvatljivosti 1) koju definiraju klase radiografskih tehnika ispitivanja (klasa B) te razina kvalitete zavarenog spoja (klasa B) [8, 9]. Navedene nepravilnosti odnose se na poroznost, odnosno detekciju njihove minimalno dopuštene veličine.

5.4.1. Postupak određivanja veličine nepravilnosti

Procjena veličine nepravilnosti provedena je u programu „ISee“ već spomenutom opcijom „profiler“ pri čemu je bilo potrebno kalibrirati veličinu piksela što je prikazano slikom 34. Softver nam omogućuje direktan unos veličine piksela, što je označeno plavo na slici 34, koja iznosi 50 μm . Nakon provedenog postupka na slikovnom zapisu je potrebno detektirati nepravilnost (poru), u slučaju da ista postoji, te izmjeriti njezine dimenzije. Kako su najsitnije nepravilnosti u normi prihvatljivosti definirane promjerom, potrebno je definirati promjer pore te usporediti sa zahtjevima norme. Postupak mjerenja prikazan je slikom 35 pri čemu udaljenost početka i kraja prikazanog „vrha“ na osi apscisi predstavlja mjerenu dimenziju.



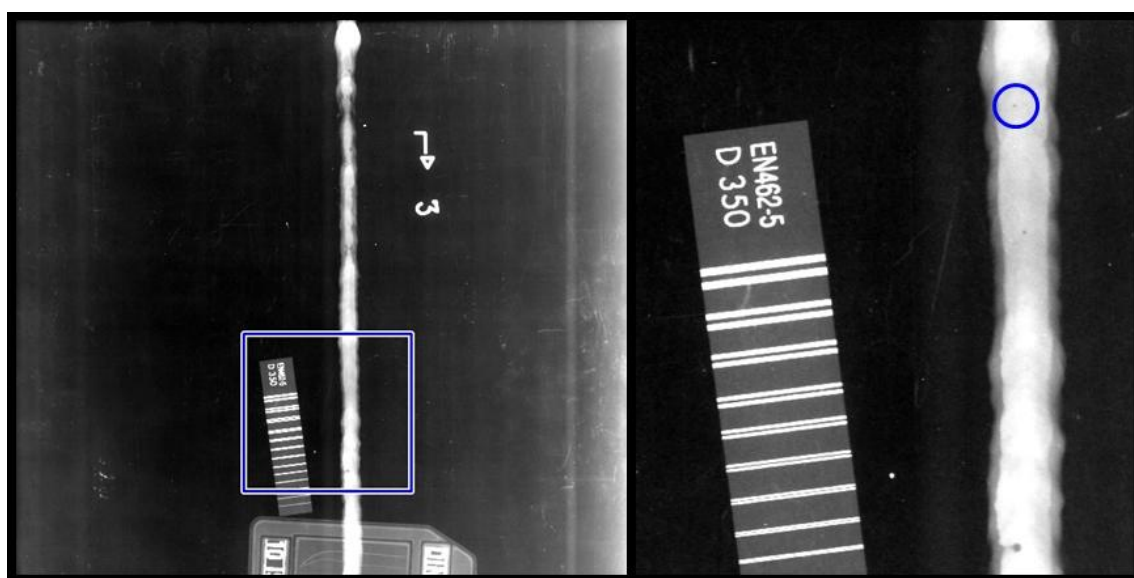
Slika 34. Kalibracija veličine piksela



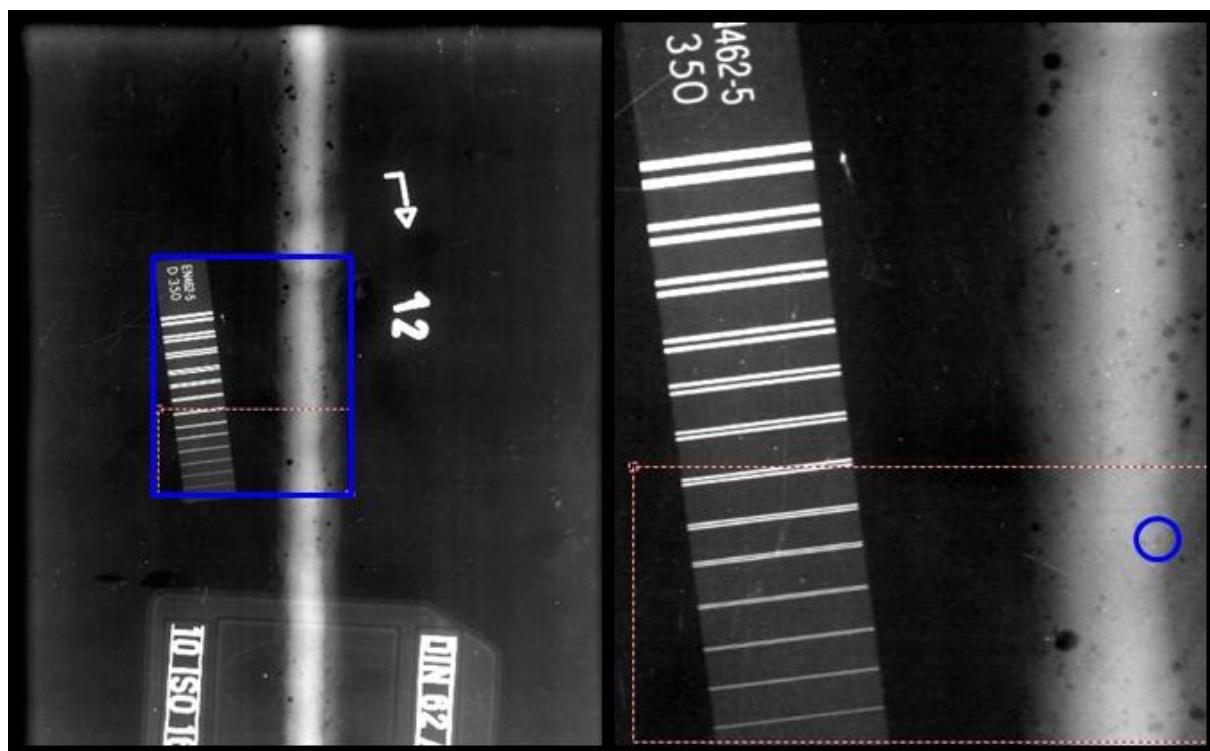
Slika 35. Mjerenje dimenzije nepravilnosti

5.4.2. Prikaz i analiza rezultata

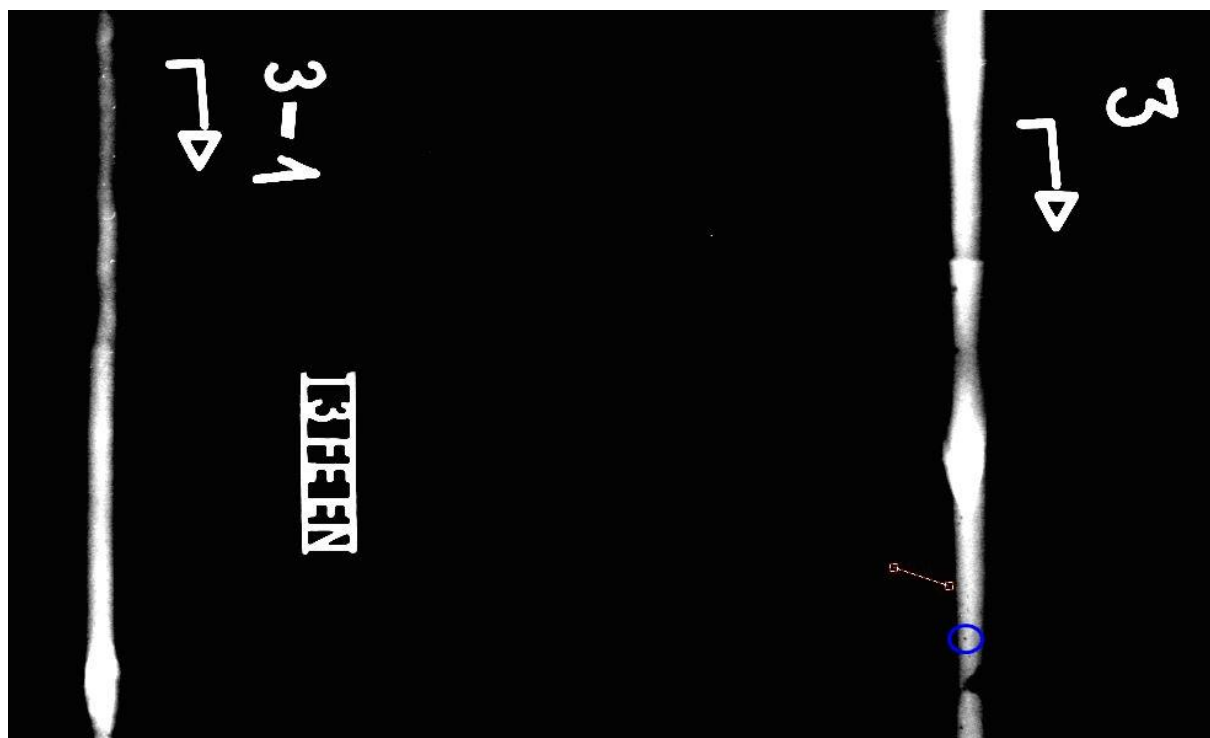
Mjerenje provedeno na svim uzorcima odnosi se na nasumično odabrane manje nepravilnosti te analizu veličine istih. Ispitane dimenzije uspoređivane su sa normom za razine prihvatljivosti za zavarene spojeve za čelik i aluminij [8, 9]. Tablicom 23 dane su dimenzije nasumično odabranih nepravilnosti dok su slikama 36 – 39 dani slikovni zapisi zavarenih spojeva na kojima su označene lokacije i detalj ispitanih nepravilnosti.



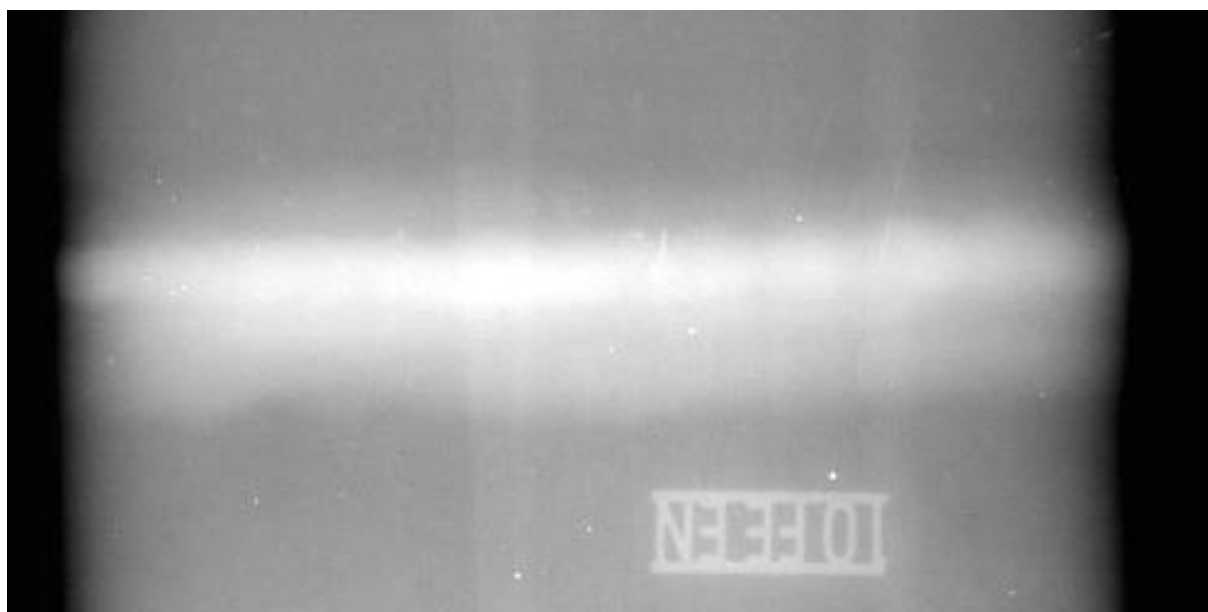
Slika 36. Slikovni zapis uzorka Al 3 i lokacija ispitane nepravilnosti



Slika 37. Slikovni zapis uzorka Al 12 i lokacija ispitane nepravilnosti



Slika 38. Slikovni zapis uzorka Fe 3 i lokacija ispitane nepravilnosti



Slika 39. Slikovni zapis uzorka Fe 20

Tablica 23. Izmjerene dimenzije nasumično odabranih nepravilnosti

Uzorak	Nominalna debljina uzorka s [mm]	Veličina (promjer) nasumično odabrane nepravilnosti $d_{\text{izmjereno}}$ [mm]	Veličine (promjer) nepravilnosti koje su dopuštene razinom prihvatljivosti 1 prema normama [8, 9] $d \leq 0,2s$ [mm], max. 3 mm
Al 3	3	0,53	0,6
Al 12	12	0,65	2,4
Fe 3	3	0,51	0,6
Fe 20	20	/	3

S obzirom na dobivene rezultate, na uzorcima Al 3, Al 12 i Fe 3 možemo detektirati nepravilnosti manjih dimenzija nego što su dopuštene normom prihvatljivosti. Na taj način možemo ocijeniti kvalitetu zavarenog spoja s obzirom na unutarne nepravilnosti. Na slikovnom zapisu uzorka Fe 20 ne uočavaju se nepravilnosti što sugerira dvije mogućnosti. Prva je da u zavarenom spoju nema nikakvih nepravilnosti, što je manje vjerojatno moguće. Druga mogućnost je (s obzirom da je u prijašnjem poglavlju dana analiza parametara kvalitete te da je na slikovnom zapisu promatranog uzorka uočljiva žica promjera 0,4 mm) prisutnost manjih nepravilnosti koje, s obzirom na postignutu osjetljivost, ne možemo detektirati.

6. ZAKLJUČAK

Cilj rada bio je definirati tehničke zahtjeve norme za računalnu radiografiju, provesti ispitivanja u skladu s istim te u konačnici analizom dobivenih slikovnih zapisa utvrditi jesu li ostvareni parametri kvalitete slike zadovoljavajući s obzirom na minimalne zahtjeve relevantnih normi.

U navedenu svrhu, provedena su ispitivanja na uzorcima dvije vrste materijala, od čega je za svaki materijal odabran raspon debljina ispitivanja. Postavke snimanja te analize slikovnih zapisa usklađene su sa zahtjevima referentnih normi pri čemu je fokus bio usmjeren prema energijama zračenja kojim su se provodila ispitivanja te analizi parametara kvalitete slikovnih zapisa.

Iako su parametri ispitivanja podešeni u skladu sa tehničkim zahtjevima norme, postignuti parametri kvalitete nisu u potpunosti zadovoljili minimalne kriterije. Najveći podbačaj ostvaren je vezano uz radiografsku osjetljivost gdje ni kod kojeg slikovnog zapisa snimanih uzoraka nisu ostvareni minimalni zahtjevi norme. Međutim, može se tvrditi kako su rezultati parametra SNR i SR_b relativno zadovoljavajući. Odnos signal/šum zadovoljio je minimalne kriterije norme na sva 4 slikovna zapisa, dok su vrijednosti postignute prostorne rezolucije na samoj granici zahtjeva norme (uzorci većih debljina), odnosno ne zadovoljavaju zahtjeve norme (uzorci manje debljine). Odnos kontrast/šum najlošiji se pokazao kod uzorka najveće debljine, što možemo staviti u svezu sa, također lošim, postignutim rezultatima radiografske osjetljivosti. S obzirom na razinu prihvatljivosti za zavarene spojeve, na svim uzorcima osim na onom najveće debljine moguće je detektirati volumne nepravilnosti manje od dopuštenih vrijednosti prema referentnoj normi što znači da iako zahtjevi norme za računalnu radiografiju i kvalitetu slikovnih zapisa nisu u potpunosti zadovoljeni, možemo ocijeniti kvalitetu zavarenih spojeva za tu vrstu nepravilnosti prema najstrožoj razini prihvatljivosti.

U svrhu poboljšanja kvalitete dobivenih slikovnih zapisa, od velike je važnosti odabrati parametre unutar zahtjeva norme, međutim, ponekad to nije dovoljno. Spomenuto se najviše odnosi na odabrane energije zračenja, koje su u ovom radu odabrane kao maksimalno dopuštene vrijednosti. Odabirom nižih mogućih energija zračenja (napona) lakše se ostvaruje vidljivost sitnijih detalja – postiže se bolja radiografska osjetljivost, što je od velike važnosti prilikom analize i detekcije nepravilnosti u zavarenim spojevima.

LITERATURA

- [1] <https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Radiographic%20Testing.pdf>, preuzeto 2.12.2017.
- [2] Predavanja iz kolegija „Računalno upravljanje nerazornim ispitivanjima“, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, <http://e-ucenje.fsb.hr/course/view.php?id=97>, preuzeto 2.12.2017.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Photostimulated_luminescence, preuzeto 11.12.2017.
- [4] http://www.cmarques.com.br/dbimg/pdf/85_115.pdf, preuzeto 15.12.2017.
- [5] Norma ISO 17636 – 2, Nerazorna ispitivanja zavarenih spojeva – Radiografsko ispitivanje sa upotrebom digitalnih detektora, izdanje 2013.
- [6] <http://www8.hp.com/h20195/v2/GetPDF.aspx/c05078649.pdf>, preuzeto 5.1.2018.
- [7] <http://www.hp.com/ctg/Manual/c02770249.pdf>, preuzeto 5.1.2018.
- [8] Norma ISO 10675 – 1, Nerazorno ispitivanje zavarenih spojeva – Razine prihvatljivosti za radiografsko ispitivanje – 1. dio: Čelik, nikl, titan i njihove legure, izdanje 2013.
- [9] Norma ISO 10675 – 2, Nerazorno ispitivanje zavarenih spojeva – Razine prihvatljivosti za radiografsko ispitivanje – 2. dio: Aluminij i njegove legure, izdanje 2010.

PRILOZI

I. CD-R disc